

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Efeito do ângulo de incidência na medida da irradiância solar

André de Almeida Pereira Nunes Raposo

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Orientador: Prof. Dr. Miguel Centeno Brito
Co-orientador: Dr. Rodrigo Amaro e Silva

Resumo

A resposta angular dos sensores de radiação solar introduz incerteza na medida da irradiação solar. Esta incerteza é relevante para, por exemplo, estimativas do potencial fotovoltaico de um determinado projeto ou região. A incerteza associada ao efeito do ângulo de incidência depende do sensor utilizado mas também da latitude do local; em latitudes mais elevadas a ocorrência de ângulos de incidência em superfícies horizontais elevados é mais frequente do que em latitudes inferiores. Por outro lado, o clima também pode influenciar a incerteza na medida da radiação solar pois em condições de céu nublado, caracterizado por maior fração de radiação difusa, a incerteza na medida é menos sensível à resposta angular do sensor.

O objetivo desta dissertação é avaliar o impacto da latitude e do clima na incerteza na medida da irradiância solar associada ao ângulo de incidência. Para o efeito, foi desenvolvido um modelo que tem em consideração uma atmosfera limpa, onde se estimou a distribuição geográfica da incerteza associada ao ângulo de incidência em função da latitude e climas locais. O mesmo foi validado com uma avaliação experimental verificada na medida da irradiância solar global horizontal em Lisboa, no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*.

Os resultados mostram que, para a resposta angular de um piranómetro típico, a incerteza na medida anual da irradiação solar associada ao ângulo de incidência é de 1,3%, maior para latitudes maiores e locais com céu limpo frequentes. Para o caso de estudo de Lisboa, os resultados mostram que o erro associado ao ângulo de incidência é 0,93% validando o modelo desenvolvido. Podemos ainda concluir que o impacto da resposta angular dos sensores de radiação solar é relevante na estimativa para o potencial solar de um determinado lugar, o que recomenda a medida de radiação solar no plano inclinado, em que os módulos vão ser colocados.

Palavras Chave: ângulo de incidência, resposta angular, irradiância solar, energia solar fotovoltaica, *Campus Solar*

Abstract

The angular response of the solar radiation sensors leads to uncertainty on the measurement of solar irradiation. This uncertainty is relevant to, for example, the estimation of the photovoltaic potential of a particular project or region. The uncertainty associated to the effect of the incidence angle depends on the sensor used but also on the latitude of the location; at higher latitudes the incidence angle on horizontal surfaces is larger than those for lower latitudes. On the other hand, the climate can also influence the uncertainty on the measurement of solar radiation; for a cloudy sky, characterized by a significant fraction of diffuse radiation, the uncertainty is less sensitive to the angular response of the sensor.

The objective of this dissertation is to evaluate the impact of the latitude and the climate on the uncertainty on the measurement of the solar irradiation associated with the incidence angle. A model to assess the geographical distribution of the uncertainty associated to the incidence angle in correlation with the latitude and local climate was developed. The same model was validated with an experimental evaluation, which itself was verified by the effect of incidence angle in global horizontal solar irradiance measured in Lisbon, more specifically in the Solar Campus of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon.

The results show that, for the angular response of a typical pyranometer, the uncertainty on the annual solar irradiation associated with the angle incidence is 1.3% higher for areas at higher latitudes and with frequently clear sky. For the study case of Lisbon, the results show that the error associated to the incidence angle is 0.93%, validating the developed model. In conclusion, the impact of the angle response of the solar radiation sensors is relevant to estimate the solar potential of a project or location, which recommends the measurement of solar radiation on the inclined plane, on which the modules will be placed.

Key words: incidence angle, angular response, solar irradiance, solar photovoltaic energy, *Campus Solar*

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1	Energia solar fotovoltaica.....	1
1.2	Medição de radiação solar e o efeito do ângulo de incidência	6
1.3	Objetivo e estrutura da dissertação.....	10
2.	Fundamentos Teóricos	11
2.1	Radiação Solar.....	11
2.1.1	Energia Solar	11
2.1.2	Espectro Solar	11
2.1.3	Movimento aparente do Sol no céu	12
2.1.4	Recurso Solar	14
2.1.5	Irradiância Solar	17
2.2	Medição de irradiância	19
2.2.1	Medição da irradiância solar direta	19
2.2.2	Medição da radiação difusa.....	23
3.	Métodos.....	24
3.1	Modelos.....	24
3.1.1	Irradiância Solar no topo da atmosfera para uma superfície horizontal	24
3.1.2	Irradiação solar para céu limpo	25
3.2	Irradiação solar à superfície – avaliação experimental.....	26
3.2.1	Equipamentos	26
3.2.2	Estimativa do erro do AOI	28
4.	Resultados	29
4.1	Distribuição geográfica AOI	29
4.2	Validação Experimental	31
4.3	Discussão.....	34
5.	Conclusões e trabalho futuro	35
6.	Referências	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolução da capacidade total cumulativa instalada de sistemas fotovoltaicos (Irena, 2019).....	3
Figura 1.2: Os dez países com maior capacidade cumulativa total instalada de sistemas fotovoltaicos (Irena, 2019).	4
Figura 1.3: Evolução da capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos desde o início do milénio e com cenários tanto para um futuro a curto prazo (2030) como para um futuro a longo prazo (2050) (Irena, 2019).	5
Figura 1.4: Distribuição da capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos continental no ano de 2018 e nos anos de 2030 e 2050 (Irena, 2019).	6
Figura 1.5: Exemplo da resposta direccional do piranómetro existente na estação de medida da radiação solar no Campus Solar.	9
Figura 1.6: Variação do zénite do sol no meio dia solar para diferentes latitudes.	10
Figura 2.1: Distribuição da energia radiante solar (Incropera, 2006).....	12
Figura 2.2: Gnómon de um relógio solar, ilustrado através da lâmina triangular representada (Wikipedia, 2020).	13
Figura 2.3: :Representação da esfera celeste com a localização aparente de algumas estrelas. O Pólo Celeste Norte (PCN) e Pólo Celeste Sul (PCS) representam os dois pontos por onde o eixo de rotação imaginário da Terra cruza a esfera celeste (Silva, 2010).	13
Figura 2.4: Variação da projecção eclíptica com as estações do ano quando observada por um observador na superfície Terrestre localizado no plano do Equador à latitude de 0° (Saraiva, 2010)	14
Figura 2.5: Variação anual da declinação solar (Kalogirou, 2009).	15
Figura 2.6: Efeito do ângulo de incidência dos raios solares em português vulgarmente designado por (θ) e em inglês como (<i>Angle-Of-Incidence</i> , AOI) na irradiância numa superfície com ou sem inclinação da mesma e ilustração quanto à seção que delimita este ângulo (Marion, 2007).	16
Figura 2.7: À esquerda esquema ilustrativo acerca das componentes constituintes da radiação global incidente na superfície Terrestre com plano horizontal (Tavares, 2014) e à direita a representação das componentes da irradiância difusa (Perez, 1987).	19
Figura 2.8: Resposta espectral da irradiância solar ao nível do mar e do piranómetro a termopar (Freire, 2008).	20
Figura 2.9: Observação em recorte de um piranómetro do modelo de termopilha, e de todos os componentes, ainda outros constituintes como os discos negro e branco que pertencem respectivamente à cúpula interna e cúpula externa (Freire, 2008).	21
Figura 2.10: Curva de distribuição da resposta espectral da irradiância solar à esquerda e à direita um exemplo de um modelo de piranómetro do tipo de sensor fotovoltaico da marca LI-COR (Freire, 2008).	21
Figura 2.11: Exemplificação de um pireliómetro (kintech engineering, 2020).	22

Figura 2.12: Respectivamente à esquerda uma exemplificação de uma esfera de uma sombreamento acoplado ao seguidor solar , à direita um anel ou banda de sombreamento fixado junto à estrutura que engloba um piranómetro (kintech engineering, 2020).....	23
Figura 3.1: Estação meteorológica no topo do edifício C1 na FCUL	26
Figura 3.2: Disposição e organização dos equipamentos na estação meteorológica da FCUL27	
Figura 4.1 RMSE quanto à incerteza de medição estimada para um piranómetro EKO MS- 802 com número de série F14005R colocado num plano horizontal. Foram considerados dados de irradiância extra-terrestre (figura de cima) e de irradiância direta para céu limpo (figura de baixo).	29
Figura 4.2:Histograma de frequências da altura solar para diferentes latitudes.	29
Figura 4.3: nRMSE [%] quanto à incerteza de medição estimada para um piranómetro EKO MS-802 com número de série F14005R colocado olocado num plano horizontal. Foram considerados dados de irradiância extra-terrestre (figura de cima) e de irradiância direta para céu limpo (figura de baixo).	30
Figura 4.4: Registo de dados de GHI,BHI,DHI para o período de dados correspondendo em calendário juliano desde o dia 32 até ao dia 326, obtidos no Laboratório de Energia Solar da <i>Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa</i>	31
Figura 4.5: Distribuição percentual do erro de fecho ao longo do período da amostragem....	32
Figura 4.6: Distribuição percentual do erro de fecho em função dos intervalos dos ângulos de altura Solar.	32
Figura 4.7:Histograma de frequências de AOI para diferentes latitudes, incluindo a latitude do caso de estudo da estação solar.	33

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Especificações sensores de radiação solar.....	27
--	----

Agradecimentos

A minha vida académica está prestes a terminar com o término desta dissertação. Fazendo uma analepse ao início da minha vida académica nada seria possível senão tivesse tido o apoio de familiares mais próximos, dos meus pais, da minha irmã e dos meus avós e da minha namorada e de bons amigos. Todos eles tiveram a sua participação positiva pelo o apoio que me foi dado em todos os bons ou maus momentos da minha vida, saber que poderei ter na mesma esse apoio para o meu futuro é muito enriquecedor. Gostaria de dar um particular agradecimento aos meus pais e aos meus avós por todos os sacrifícios feitos que possibilitaram ter a educação que tive.

Concretamente para esta dissertação gostaria inicialmente de dar um agradecimento pelo o alavancar que o Sr. Dimitri, Técnico superior da *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa* responsável por coordenar todo o piso 1 do edifício C1 e ainda colaborar na estação meteorológica no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, me deu, com a divulgação de dados dos sensores existentes e leituras da irradiância solar e na ajuda da integração dos mesmos no software de apoio matemático Matlab.

Posteriormente, numa fase mais avançada surgiu a oportunidade do Dr. Rodrigo Amaro e Silva em conjunto com o meu orientador Dr. Miguel Brito, de ajudarem-me de forma muito significativa no desenvolvimento desta dissertação. Mais tarde, em conjunto com o meu orientador Dr. Miguel Brito, decidiu-se por bem alterar o co-orientador desta dissertação que até então não tinha sido um membro ativo, e tornar o Dr. Rodrigo Amaro e Silva co-orientador. Desde então foi criada uma estreita rotina de trabalho, que permitiu o término desta dissertação.

Por último, gostaria ainda de agradecer pela participação ativa da minha irmã Beatriz Raposo, da minha namorada Patrícia Simplício e de um colega do mestrado integrado, o Ricardo Guerreiro por me terem ajudado na escrita e no apoio a esta dissertação.

Nomenclatura e Abreviações

PARÂMETROS/ÍNDICES	DESCRIÇÃO
A	Altura Solar em graus centígrados
B	Inclinação da superfície em graus centígrados
Γ	Ângulo do dia em graus centígrados
δ	Declinação solar em graus centígrados
θ_0	Ângulo de incidência da radiação solar numa superfície inclinada em graus centígrados
φ_s	Ângulo solar horário em graus centígrados
AM	<i>Air mass</i> (massa de ar)
AOI	<i>Angle-Of-Incidence</i> (ângulo de incidência da radiação solar ou zénite solar e vulgarmente em Português de Portugal também ilustrado por θ_s) em graus centígrados
APAC	Países pertencentes à região entre Ásia e o oceano Pacífico
BHI	<i>Beam Horizontal Irradiance</i> (irradiância direta de fecho horizontal) em Wm^{-2}
BHI_C	<i>Beam horizontal irradiance</i> e <i>clear-sky</i> (irradiância direta para céu limpo) em Wm^{-2}
COP21	Conferência das Nações Unidas representadas por 21 países sobre as alterações climáticas
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i> (irradiância difusa horizontal) Wm^{-2}
DN	Variável temporal representada em dias julianos
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i> (irradiância normal direta) em Wm^{-2}
E_0	Irradiância solar no topo da atmosfera em Wm^{-2}
E_{sc}	Constante de irradiância solar global média anual em Wm^{-2}
GEE	Gases com efeito de estufa
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i> (irradiância global horizontal) em Wm^{-2}

MEA	Países pertencentes à região entre a África Ocidental e o Egipto
PCN	Pólo Celeste Norte
PCS	Pólo Celeste Sul
_NRMSE	<i>Normalized Root Mean Squared Error</i> (normalização do erro médio quadrático)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (erro médio quadrático)
TL	<i>Atmosferic Turbidity factor</i> (fator de turbidez atmosférico) de Linke
SG2	<i>Algorithm Solar geometry</i> (algoritmo solar geométrico)

1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a motivação para o presente trabalho, sobre a importância da incerteza nas medidas de radiação solar e a sua relevância para a análise de sistemas de energia solar fotovoltaica, em particular, o efeito do ângulo de incidência. São ainda apresentados os objetivos e estrutura da dissertação.

1.1 Energia solar fotovoltaica

Desde sempre a humanidade necessitou de energia para as suas diversas atividades. Mas se inicialmente as energias que utilizava eram as que dispunha na natureza (lenha, força motriz das águas dos rios e do vento), uma nova etapa iniciou com o aproveitamento de recursos fósseis como o carvão e o petróleo e, mais recentemente, o gás natural. A existência na natureza de grandes quantidades de energia de origem fóssil, inicialmente a preços reduzidos, constituiu uma aceleração do desenvolvimento da sociedade atual, atingindo-se níveis nunca antes alcançados.

Decorridas duas décadas após o início do século XXI, a humanidade atravessa um problema energético complexo. Por um lado, a procura crescente de energia por todas as economias e em especial pelas emergentes, provoca uma subida global dos preços internacionais das energias disponíveis. Por outro lado há cada vez mais evidências científicas, de que o modelo energético atual, incluindo as atuais tecnologias, está a provocar mudanças climáticas no nosso planeta, por libertarem gases com efeito de estufa (GEE) para a atmosfera, com implicações que atualmente já são visíveis, e que no futuro serão imprevisíveis, devido a estarem a provocar o aumento da temperatura no planeta Terra. Estas mudanças climáticas atuais embora já conhecidas há algum tempo, estão a elevar a ocorrência de fenómenos climáticos adversos como tempestades, secas e inundações. O incremento da temperatura na Terra também está a provocar uma perda acelerada das suas massas de gelo conduzindo à subida do nível do mar, pondo em perigo as zonas costeiras e ilhas.

Por conseguinte, têm sido desenvolvidos esforços no sentido de tentar mitigar estas alterações climáticas, decorrendo diversas conferências climáticas, concretamente a COP21 que delineou o acordo de Paris, com os principais países a adotarem um compromisso da neutralidade carbónica até 2050 e da limitação do aumento da temperatura global abaixo de 2°C. Para isso o modelo energético atual que já possui uma larga quantidade de energias obtidas de fontes alternativas não poluentes e extraídas a partir de recursos renováveis, até lá terá de ter uma participação ainda mais significativa. Com isso, a transição energética em curso a fim de atingir os compromissos climáticos deverá reformular o sector dos transportes com a profunda eletrificação do sector. Então com as medidas que serão tomadas pelos governos das várias nações mundiais e com o desenvolvimento das mais diversas tecnologias de energias renováveis, espera-se assim atingir o pressuposto.

Quanto a estas tecnologias de energias renováveis amplamente conhecidas e outras que poderão surgir num futuro próximo, existem questões que se esperam serem resolvidas no sentido de se tornarem cada vez mais atrativas e podendo assim terem a evolução esperada. Concretamente de todas as energias renováveis, a energia fotovoltaica associada ao aproveitamento do recurso solar para a geração de energia elétrica e que poderá representar uma maior preponderância no novo modelo energético mundial num futuro próximo devido ao vasto recurso disponível e também à facilidade de obtenção de geração de energia elétrica.

Para isso, há três métodos principais para a captura de energia solar. O primeiro consiste em expor diretamente ao sol longos tubos cheios de um líquido isolante. O líquido nos tubos aquece e, através de um permutador de calor, pode ser usado para aquecer água para chuveiros ou para lavar a roupa, ou usos industriais. O segundo modo consiste na conversão da energia solar em energia fotovoltaica, através da conversão da irradiação solar em eletricidade por meio de um princípio físico que converte a energia presente em cada fóton em eletricidade, que se designa por efeito fotovoltaico (Masson, 2009). Finalmente, há os concentradores solares, que utilizam espelhos para concentrar grandes quantidades de luz solar numa pequena área, aquecendo intensamente fluidos e depois usando a energia para levar uma turbina a gerar eletricidade.

Desde o surgimento das células fotovoltaicas nos finais dos anos 50 do séc. XX, tem-se verificado um melhor desempenho de conversão em energia elétrica de um modo constante ao longo dos anos, à medida que se tem reduzido os custos de fabrico e de instalação das mesmas e exponenciado a produção de eletricidade.

A mais recente crise financeira mundial ocorrida no final da primeira década do séc. XXI, potenciou a entrada do mercado asiático na indústria de produção de sistemas solares fotovoltaicos. Devido às consequências dessa mesma crise financeira, a produção até então mais centralizada a nível europeu, foi-se descentralizando e instalando-se em países asiáticos, visando uma ótica de redução de custos. Essencialmente essa centralização da produção Europeia de células visava alimentar o mercado interno europeu de geração de energia elétrica devido às políticas de incentivo à produção de células. Logo, o mercado asiático corresponde a 85%, o europeu a 11% e o do resto do mundo a 4% da produção mundial. Particularmente, a produção de módulos solares fotovoltaicos na China corresponde a 64% do mercado asiático (Irena, 2019).

Consequentemente, já se verificava um decréscimo acentuado dos custos dos sistemas solares fotovoltaicos e dos restantes componentes antes da crise dos mercados financeiros, mas com a descentralização da indústria de produção para países asiáticos, o decréscimo dos custos ainda foi mais acentuado. Com isso, possibilitou-se que a tecnologia solar fotovoltaica se tornasse mais atrativa quer em termos financeiros quer em termos tecnológicos face a outras tecnologias não renováveis para geração de eletricidade, proporcionando maiores lucros financeiros aos operadores nos sistemas elétricos a nível mundial. Também levou a uma busca incessante de novos constituintes para as células solares fotovoltaicas mais acessíveis do ponto de vista económico por parte dos produtores devido à diminuição das margens de proveitos financeiros.

Embora aquando da crise dos mercados financeiros existiu um revés a nível europeu no investimento em instalações de sistemas solares fotovoltaicos pois estavam a ser aplicadas medidas na redução da tarifa de energia elétrica que permitia uma maior competitividade dos sistemas solares fotovoltaicos com as de tecnologia convencional. Então, este constrangimento financeiro verificado a nível europeu conduziu a que a maior produção que os países asiáticos

detinham, não detivesse a procura desejada por parte de outros mercados financeiros. Com isso, a competitividade da tecnologia foi aumentando, o que levou ao abastecimento do mercado interno destes mesmos países, a uma substituição progressiva das tecnologias convencionais até então que lideravam o respectivo modelo energético. Naturalmente em 2015, os países asiáticos e do pacífico (APAC) praticamente igualaram a capacidade de potência instalada de sistemas solares fotovoltaicos que a Europa detinha (Irena, 2019).

Contudo, a nível mundial tem-se constatado que o mercado de instalação de sistemas solares fotovoltaicos está em crescimento desde o início do séc. XXI, tendo aumentado 150 vezes a sua capacidade instalada a nível mundial até 2015. Onde, nesse mesmo ano a capacidade de potência instalada de sistemas solares fotovoltaicos era de 229 GW, 96 GW pertenciam aos países asiáticos e do pacífico, 97 GW à Europa, 31 GW ao continente americano, ainda 2 GW pertenciam aos países da África ocidental e ao Egito (MEA) e os restantes 4 GW ao resto do mundo (RoW). Estes números encontram-se ilustrados no gráfico da Figura 1.1, onde também é possível analisar a evolução dos mesmos desde o início do milénio.

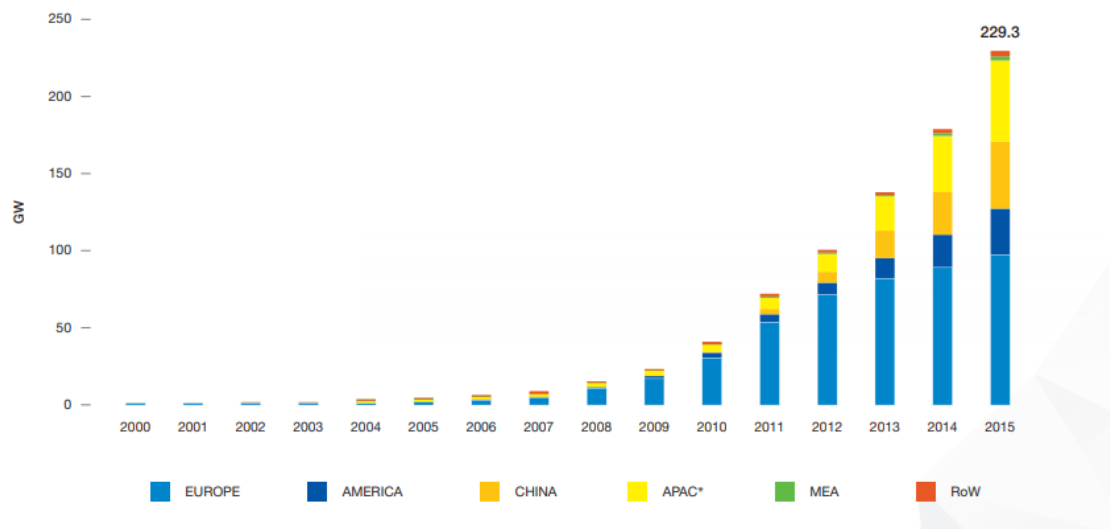


Figura 1.1: Evolução da capacidade total cumulativa instalada de sistemas fotovoltaicos (Irena, 2019).

Pela primeira vez desde o início do milénio, concretamente no final do ano 2015, a Alemanha não é mais o país com maior capacidade de potência instalada de sistemas solares fotovoltaicos. A China não só veio a constituir-se no país com maior produção das mesmas células como também viria a ser o país com maior capacidade solar instalada do mundo inteiro. Atingiu os 43,5 GW de capacidade cumulativa total de solar, face aos ainda não atingíveis 40 GW na Alemanha, onde a capacidade cumulativa total na China representa uma participação de 19% no mercado global. O Japão constitui-se como o terceiro país com maior capacidade cumulativa total de solar, com 34,3 GW, de seguida os EUA com 25,6 GW e Itália com 18,6 GW. Depois nos países com capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos abaixo dos 10 GW, evidencia-se o Reino Unido com 9,1 GW, França, Espanha, Austrália e Índia, respetivamente, com 6,5, 5,4 e 5,1 GW. Podem ser melhor visualizados estes números no gráfico da Figura 1.2 que representa a situação descrita associada ao final do ano analisado.

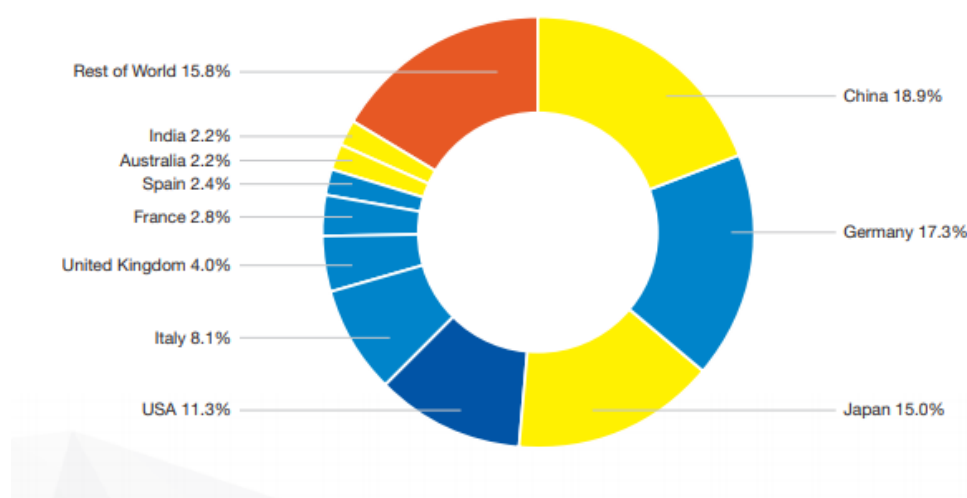


Figura 1.2: Os dez países com maior capacidade cumulativa total instalada de sistemas fotovoltaicos (Irena, 2019).

O crescimento do mercado global de capacidade cumulativa de solar tem vindo ano após ano a bater recordes de crescimento. Por sua vez, no final do ano de 2018, face ao final do ano de 2015, verificou-se que a capacidade cumulativa solar a nível global cresceu mais de 110%, atingindo então 480 GW (Figura 1.3) no final do respectivo ano de 2018.

Nas próximas décadas espera-se que o crescimento das energias renováveis a nível mundial continue a aumentar de forma ainda mais significativa. Para isso, têm sido desenvolvidos esforços para mitigar as questões climáticas que afligem a Humanidade, culminando em incentivos financeiros para providenciar os melhores desenvolvimentos tecnológicos e contituírem-se como o futuro modelo energético mundial. Assim, espera-se potenciar a capacidade cumulativa solar para um aumento de seis vezes mais nos próximos dez anos, atingindo-se 2840 GW. Por sua vez, para 2050, ainda tem de se verificar o cumprimento das medidas ambientais mitigadoras mais restritivas tomadas a nível mundial que poderão conduzir à neutralidade carbónica esperada, espera-se então o maior crescimento da capacidade cumulativa solar para 8519 GW. Implicando que face ao ano de 2018, um crescimento de 18 vezes da mesma, conforme ilustrado na Figura 1.3:

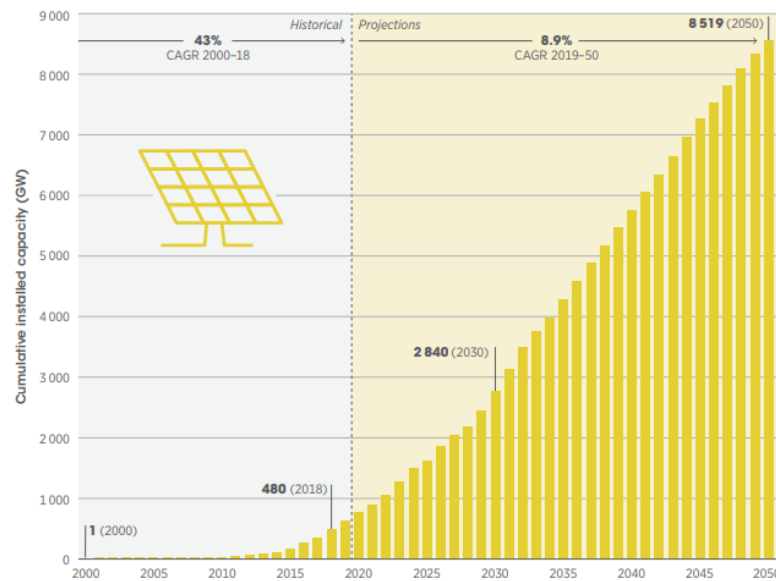


Figura 1.3: Evolução da capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos desde o início do milénio e com cenários tanto para um futuro a curto prazo (2030) como para um futuro a longo prazo (2050) (Irena, 2019).

No final do ano de 2018, o mercado solar global foi dominado pela Ásia, este continente era já detentor da maior capacidade cumulativa instalada de sistemas solares fotovoltaicos a nível mundial, correspondendo a um valor acima da soma de todos continentes. Com 280 GW, face aos 121 GW verificados na Europa, aos 55, 10, 8, 7 GW respetivamente na América do Norte, na Oceânia, em África e na América do Sul, de fácil visualização na Figura 1.4.

Por conseguinte, no futuro quer seja a longo ou a curto prazo, a repartição do mercado solar global irá estar de todo dependente de futuras novas medidas pelas nações mundiais e o cumprimento das mesmas já estabelecidas. Então, não se preveem alterações significativas nessa mesma repartição sendo apenas uma possível alteração da América do Norte a superar a capacidade instalada no continente europeu. Conforme será esperada, a capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos irá aumentar com muito mais proporção no futuro (Figura 1.4) e o crescimento da mesma estará também intrinsecamente dependente de fatores já analisados.

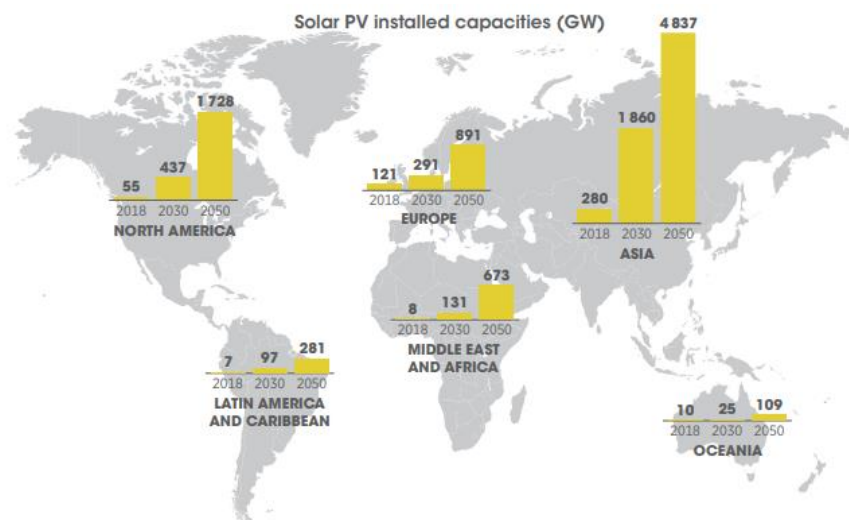


Figura 1.4: Distribuição da capacidade cumulativa total de sistemas solares fotovoltaicos continental no ano de 2018 e nos anos de 2030 e 2050 (Irena, 2019).

O desenvolvimento da tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica tem sido enorme até aos dias de hoje. Mas, ainda terá de ocorrer um desenvolvimento significativo para minimizar questões como a variabilidade das condições climáticas associadas à sazonalidade das estações do ano e da localização estratégica da escolha do local face ao potencial de recurso solar. Para isso é necessário efetuar uma monitorização contínua e preventiva dos sistemas solares fotovoltaicos para que a rentabilidade seja valorizada ao máximo.

1.2 Medição de radiação solar e o efeito do ângulo de incidência

Do ponto de vista da energia solar fotovoltaica, medições do recurso solar são de particular importância para, pelo menos, duas aplicações: i) a avaliação do recurso solar, permitindo fazer projeções quanto ao potencial fotovoltaico de um dado local; ii) a monitorização do desempenho de sistemas solares, de forma a identificar de forma atempada potenciais avarias ou níveis acentuados de degradação do equipamento. Em particular, uma monitorização contínua e preventiva pode ser efetuada através da comparação da produção prevista com a produção real.

A aquisição de dados de irradiância solar global e das suas componentes direta e difusa é feita através de instrumentos capazes de medir a radiação solar, integrada sob os diversos comprimentos de onda. Os instrumentos frequentemente utilizados para este efeito são o pireliómetro e o piranómetro. O piranómetro consiste num sensor que mede a irradiância global direta e difusa, as leituras e registo de dados ocorrem numa faixa espectral entre 285 a 2850 nm, podendo nalguns modelos de sensores chegar a um intervalo máximo dessa faixa espectral na ordem dos 4000 nm. Este equipamento pode ser utilizado em diversos planos em relação à superfície onde esteja inserido quer tanto num plano horizontal quer num plano inclinado ou mesmo inverter a superfície, de modo a ficar voltado para baixo registando a irradiância global que é refletida para o espaço sideral.

Na sua constituição podem ser utilizados elementos termoeletricos, fotoeletricos, piroeletricos ou bimetálicos como sensor. Os mesmos elementos, incluem propriedades físicas possibilitando a classificação dos piranómetros em diferentes níveis de desempenho e incerteza. Os indicadores de avaliação de desempenho e incerteza são: a resposta espectral, sensibilidade (que é determinada pelas suas propriedades físicas, como potência termoeletrica, condutividade térmica das junções e pelas dimensões do elemento sensor), impedância, tempo de resposta, linearidade, influência da temperatura ambiente, temperatura de operação, resposta direcional, estabilidade (Guimarães, 2009).

Por sua vez, estes equipamentos de medição podem ser classificados quanto à precisão: padrão secundário, primeira classe e segunda classe, inferindo quanto à ordem crescente de qualidade destes equipamentos de medição segundo a *ISO* (Organização Internacional de Normalização), *OMM* (Organização Meteorológica Mundial). Um piranómetro é classificado de acordo com a norma N°8 da OMM e com a norma *ISO* 9060-1990. Por sua vez, para que um sensor seja classificado numa determinada categoria, é necessário que o mesmo cumpra todos os seguintes parâmetros (Freire, 2008). Consequentemente, citando e adaptando ao léxico da língua Portuguesa de Portugal, esses mesmos parâmetros que interferem quanto à classificação desses mesmos sensores, são:

1. “Tempo de resposta: Corresponde a uma medida da inércia térmica referente ao período de estabilização aquando da leitura final. O instante inicial do cronómetro é determinado aquando ligada uma fonte, o sinal de saída será zero e o instante final quando o sinal atinge 95% do valor máximo”.
“Limites: Para a categoria padrão secundário esse tempo é <15s, para o de 1ª classe é <30s e para o de 2ª classe é <60 s. “.
2. “Compensação do ponto-zero: a) é uma medida da estabilidade do ponto-zero especificada para a resposta de 200 Wm^{-2} de radiação térmica líquida com ventilação; b) outra medida de estabilidade do ponto-zero especificada para a resposta onde há uma mudança de 5 K/h na temperatura ambiente”.
“Limites: Para a categoria padrão secundário a) $\pm 7 \text{ Wm}^{-2}$ e b) $\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$, na de 1ª classe a) $\pm 15 \text{ Wm}^{-2}$ e b) $\pm 4 \text{ Wm}^{-2}$ e para a 2ª classe a) $\pm 30 \text{ Wm}^{-2}$ e b) $\pm 8 \text{ Wm}^{-2}$ ”.
3. “Não-estabilidade: Correspondendo à percentagem de mudança anual na resposta aos efeitos do envelhecimento. Constituí-se como uma medida de estabilidade da constante de calibração no período respectivo de um ano“.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 0,8\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 1,5\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 3\%$.”.

4. “Não-linearidade: Desvio percentual da percentagem em 500 Wm^{-2} devido à mudança na irradiância dentro de 100 Wm^{-2} a 1000 Wm^{-2} ”.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 0,5\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 1,5\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 3\%$.”.

5. “Resposta à temperatura: Traduz-se na medida da variação da leitura do instrumento com a temperatura. Faz-se incidir a irradiância de uma fonte de luz sobre o difusor do piranómetro à temperatura ambiente e, em seguida, procede-se a aumentos de temperatura até que a variação da temperatura esteja dentro do intervalo de 50K. De seguida, comparam-se os valores dos sinais de saída à temperatura ambiente e à temperatura superior. O resultado obtido é dado em percentagem”.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 2\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 4\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 8\%$.”.

6. “Resposta à inclinação (ou resposta ao co-seno): É determinada em percentagem. Começa-se por fazer incidir, normalmente, sobre o difusor do piranómetro a luz de uma fonte que produz 1000 Wm^{-2} e anota-se o valor do sinal. Depois, o piranómetro é inclinado com uma certa inclinação angular em relação à fonte, anota-se novamente o valor obtido. Com esses dados é determinado o co-seno desse ângulo que é a relação entre o sinal medido na inclinação e o sinal obtido segundo a normal. Posteriormente, esse resultado é comparado com o co-seno trigonométrico do mesmo ângulo”.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 0,5\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 2\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 5\%$.”.

7. Resposta direccional ou resposta ao ângulo de incidência dos raios solares: Para assegurar que os valores limitados são encontrados, tendo em conta as diferenças quanto aos materiais dos sensores face a outros fabricantes, medidas devem ser feitas da resposta relativa à incidência normal nas seguintes direcções: para ângulos de incidência de 20° , 40° , 60° , 70° e 80° e diferentes latitudes em todo o globo, procede-se ao registo das incertezas relativas quanto às medições efetuadas.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 10\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 20\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 30\%$ ”.

8. “Seletividade espectral: Corresponde ao desvio percentual do produto da absorptância e transmitância espectral da média correspondente no intervalo entre 0,35 μm e 1,5 μm . Por sua vez, a medida da selectividade espectral de um piranómetro necessita de uma técnica de medida de alta sensibilidade. Os limites da faixa de comprimento de onda são determinados usando vidro Schott do tipo WG 295 e K5. Se a irradiância de uma lâmpada incandescente é aplicada, deve-se considerar uma faixa de comprimento de onda maior que 1500 nm”.

“Limites: Para a categoria padrão secundário $\pm 3\%$ e para a categoria 1ª classe $\pm 5\%$ e para a categoria 2ª classe $\pm 10\%$ “.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo do parâmetro da resposta direccional uma vez que é um dos fatores menos explorado na literatura científica e que tem um impacto relevante para a qualidade das medidas sobretudo para latitudes maiores. Sabendo que cada sensor é devidamente calibrado e o método de calibração constitui-se diferente para outros sensores do mesmo tipo, então a resposta de cada sensor à variação da posição do Sol será diferente, originando diferenças de qualidade quanto às medições lidas nos mesmos. Será então diferente com a duração do dia solar num ano, com a época do ano, com o clima local, bem como com a latitude do local. As incertezas relativas relativamente ao ângulo de incidência dos raios solares serão maiores nas medições aquando ao fim do dia solar bem como em latitudes mais altas, pois quer numa e noutra situação coincidem quando a posição do Sol no céu está mais baixa, perdendo-se qualidade na resposta de cada sensor. Por outro lado, as mesmas também são mais relevantes para a irradiância direta, ou em inglês “beam”, uma vez que a irradiância difusa pode ser considerada, em primeira aproximação, como isotrópica. Consequentemente, uma medição da irradiância global horizontal num local com uma fração difusa alta (onde a irradiância difusa representa uma parte significativa da irradiância global) será menos sensível à resposta direccional do piranómetro.

É importante frisar que não existe um comportamento típico de resposta direccional dos sensores de radiação. Como exemplo, a Figura 1.5 apresenta a resposta direccional calibrada, ou seja, a incerteza na medição da irradiância devido ao ângulo de incidência, para o piranómetro utilizado da marca EKO modelo MS-802 com número de série F14005R na estação de medição de radiação solar do *Campus Solar* na *Faculdade de Ciências de Universidade de Lisboa* (EKO, 2018) com um piranómetro de outra marca comumente utilizada, a Kipp & Zonen, com o modelo CM 21 (Kipp & Zonen, 2020).

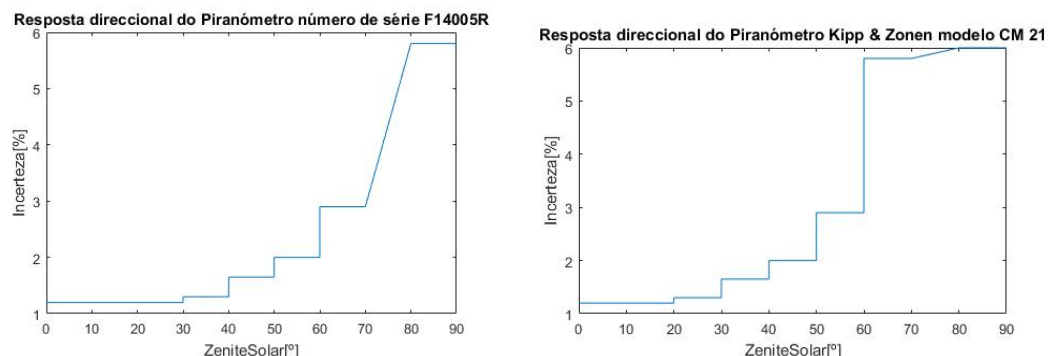


Figura 1.5: Exemplo da resposta direccional do piranómetro existente na estação de medida da radiação solar no *Campus Solar*.

A altura do sol (ou o zénite, o ângulo complementar) vista por um observador no planeta Terra varia com a coordenada geográfica da latitude. Então, a incerteza experimental associada à resposta direcional também irá variar de acordo com a latitude de onde se situe o observador no planeta terrestre. Na Figura 1.6 ilustra-se a posição máxima do sol ao meio dia solar num ano em função da variação da coordenada geográfica da latitude.

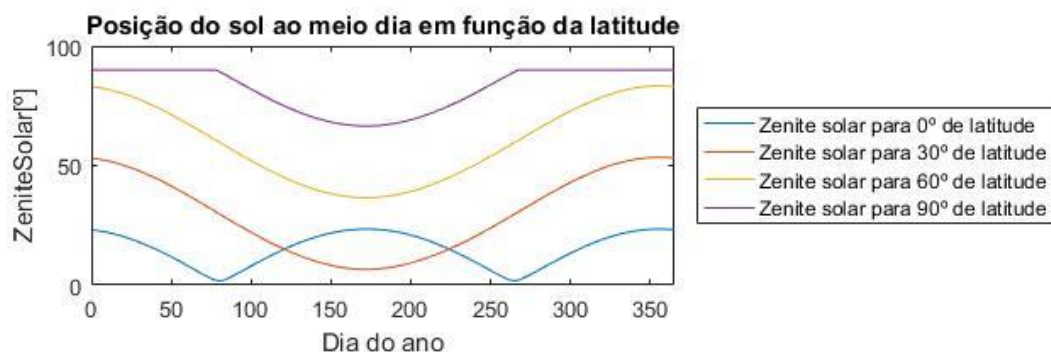


Figura 1.6: Variação do zénite do sol no meio dia solar para diferentes latitudes.

Pode-se pois verificar que o ângulo de incidência da radiação solar numa superfície horizontal varia significativamente ao longo do ano e ao longo da latitude.

1.3 Objetivo e estrutura da dissertação

Como a incerteza experimental introduzida pelo efeito do ângulo de incidência (AOI na sigla em inglês) depende do local onde é feita a medição interessa avaliar como varia o ângulo de incidência.

Nesta dissertação, a abordagem é simultaneamente de modelação e experimental. Por um lado, desenvolveu-se um modelo para determinar a incerteza na medição da radiação solar devido ao AOI em função da latitude. Depois o modelo é comparado com medições de radiação solar na estação solar no Campus Solar da *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*.

A presente dissertação encontra-se organizada por cinco capítulos. Neste primeiro capítulo apresenta-se a motivação e objetivos do trabalho.

No segundo capítulo descreve-se uma revisão dos conceitos relevantes, nomeadamente da radiação solar e das suas componentes, os diversos sensores de medição existentes e os principais erros associados.

No terceiro capítulo são apresentados os modelos de radiação solar relevantes para o cálculo da distribuição geográfica do efeito do ângulo de incidência na medida da irradiância solar.

O quarto capítulo, com os resultados, apresenta os modelos de distribuição geográfica do erro associado ao ângulo de incidência e a sua validação experimental.

No quinto capítulo descrevem-se as conclusões sobre o trabalho realizado e eventuais sugestões quanto a possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo será apresentada uma revisão dos conceitos relevantes para esta dissertação, nomeadamente da irradiância solar global e das suas componentes ao nível da superfície da Terra, uma descrição pormenorizada dos instrumentos de medição da mesma e das suas componentes e ainda os principais erros associados às medições.

2.1 Radiação Solar

2.1.1 Energia Solar

O Sol sendo uma fonte inesgotável de energia para o planeta, a irradiância por ele emitida pode ser aproveitada para diversas aplicações. Entre as quais se destaca o aproveitamento, através da irradiância solar global no plano horizontal, para produção de energia elétrica, com a exposição à luz ou radiação eletromagnética por parte de materiais semicondutores, através do efeito fotovoltaico.

A composição do Sol é de 80% de hidrogénio, 20% de hélio e os restantes 0,1% de outros elementos. É caracterizado como sendo um corpo negro a emitir permanentemente radiação à temperatura de 6000 K. O seu poder radiante provém dos processos de fusão nucleares, onde o sol perde 4,3 milhões de toneladas de massa a cada segundo e sendo convertida em energia radiante. Apenas uma pequena parte desta energia atinge a superfície Terrestre e onde a irradiância solar global no plano horizontal diminui com o quadrado da distância ao Sol (Quaschnig, 2003).

Devido ao facto da variação da distância da Terra ser variável ao longo do ano, decorrente da sua trajetória elíptica da Terra, a irradiância solar medida acima da atmosfera será variável ao longo do ano e onde o valor médio que decorre é de $1367 \pm 2 \text{ Wm}^{-2}$. A variação da irradiância solar global no plano horizontal na superfície é maior, devido a efeitos de absorção e reflexão nas camadas da atmosfera, também à sazonalidade das estações do ano, da atividade humana e da latitude do local (Morais, 2009).

2.1.2 Espectro Solar

A energia radiante do Sol, a nossa estrela do sistema solar, que comporta-se como um corpo negro e emitindo energia radiante que atinge todos os corpos celestes do sistema solar. Então, no planeta Terra a energia radiante que é percebida por observadores Terrestres como radiação solar na região do visível é menor que aquela que atinge as camadas superiores da atmosfera. Naturalmente existem diferenças quanto à distribuição de energia radiante quer ao nível das camadas superiores da atmosfera quer ao nível da superfície Terrestre, conforme observado na Figura 2.1. Diferenças essas que são explicadas por bandas de absorção de componentes da atmosfera Terrestre.

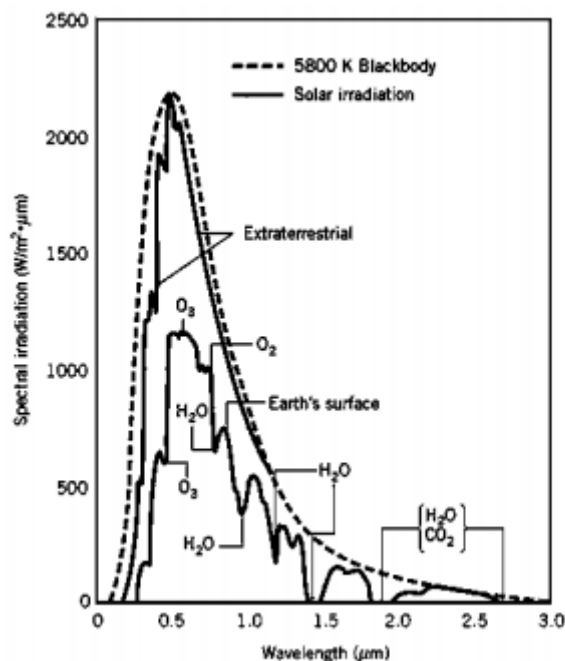


Figura 2.1: Distribuição da energia radiante solar (Incropera, 2006)

Para além dos fenómenos atmosféricos que interferem na energia radiante que chega à superfície da Terra, verifica-se outro fator que consiste na distância que a mesma tem de percorrer ao atravessar a atmosfera sendo absorvida pelo o ar e pela partículas na atmosfera, designando-se por *Air Mass* (AM). A massa de ar varia tendo em conta a posição relativa do Sol, fornecendo uma medida de atenuação da atmosfera que quando maior for o ângulo de incidência dos raios solares, maior será o percurso percorrido pelos fotões e então maior probabilidade da radiação solar ser absorvida ou dispersa na atmosfera.

2.1.3 Movimento aparente do Sol no céu

Desde cedo a humanidade moveu-se pelo desejo de compreender os acontecimentos e as manifestações que faziam parte do quotidiano, como a observação do movimento aparente do Sol no planeta Terra ao longo do dia . Embora até então os instrumentos para medições e pesquisas fossem bastante rudimentares e ficassem restritos a observações das constelações vistas no céu e da sombra solar projetada através de gnómons, constituinte de um relógio solar que possibilita a projecção de uma sombra, como exemplificado na Figura 2.2.



Figura 2.2: Gnómon de um relógio solar, ilustrado através da lâmina triangular representada (Wikipedia, 2020).

Por sua vez, essas poucas informações recolhidas foram sendo registadas e passadas de geração em geração. Possibilitou-se que a sucessão dos dias e dos anos, o movimento aparente do Sol e a duração aproximada do dia solar, passassem a ser eventualmente melhor estudados. Estas foram as bases para o desenvolvimento da astronomia. Diversas civilizações como a *Egípcia*, *Grega*, *Chinesa*, *Maia* e *Inca*, foram pioneiras no desenvolvimento de calendários baseados no movimento da Lua, do Sol e numa série de outros fenómenos como as revoluções sinódicas dos planetas, a periodicidade dos eclipses, entre outros. Contudo, a civilização *Grega* foram das civilizações com maior notoriedade em diversas áreas, particularmente no desenvolvimento de conceitos e teorias que atravessaram a história da humanidade até aos dias de hoje, como a do modelo da esfera celeste.

Consequentemente, na civilização Grega, conceptionavam que o planeta Terra estivesse envolto numa enorme esfera celeste em movimento, no espaço sideral com inúmeras estrelas e constelações. Daí nasce justamente o termo geocêntrico, com o planeta Terra justamente ao centro dessa mesma esfera celeste, conforme ilustrado na Figura 2.3. Através da concepção deste modelo, na atualidade proporcionou-se a partir dele a compreensão do movimento aparente dos astros no céu. De onde, se consegue localizar em tempo real a posição de um astro no modelo da esfera celeste, a partir das suas coordenadas astronómicas.

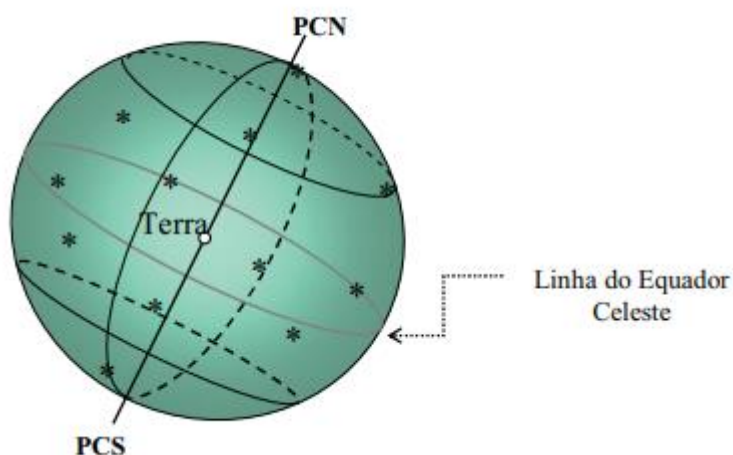


Figura 2.3: :Visualização do modelo da esfera celeste com a localização aparente de algumas estrelas. O Pólo Celeste Norte (PCN) e Pólo Celeste Sul (PCS) representam as duas extremidades onde o eixo de rotação imaginário da Terra cruza a esfera celeste (Silva, 2010).

Como a Terra, se encontra ao centro do modelo, infere-se quanto à definição dos movimentos aparentes do Sol, percebidos a partir de um observador Terrestre sejam quais as coordenadas geográficas. Devido ao movimento de rotação da Terra, de oeste para leste, o Sol descreve um movimento aparente diário, de leste para oeste. Relativamente ao movimento de translação da Terra ao redor do Sol, associado à inclinação do eixo de rotação da Terra, resulta num movimento aparente anual do Sol, intrinsecamente ligado às estações do ano.

Define-se, então o movimento aparente do Sol ao longo do ano, por Eclíptica. A Eclíptica consiste na projecção sobre o modelo da esfera celeste da trajectória aparente do Sol quando observada na Terra. Consequentemente nesta projecção existe uma variação angular em relação à vertical local para latitudes diferentes da latitude do equador. Caso o observador esteja a Norte do equador, a projecção eclíptica inclina-se para Sul e o reverso caso o observador se localize a Sul do equador, a mesma inclina-se para Norte, estando representadas na Figura 2.4.

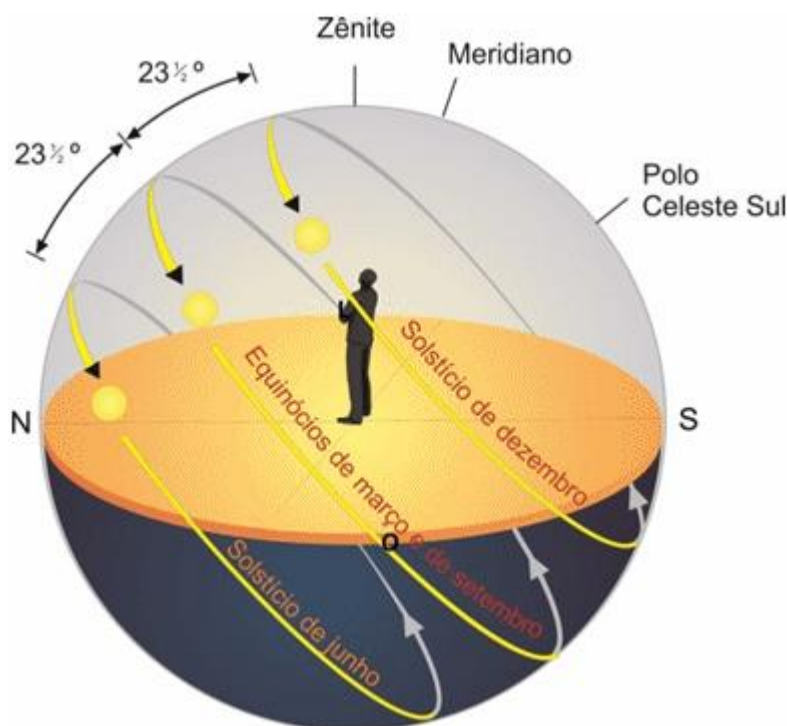


Figura 2.4: Variação da projecção eclíptica com as estações do ano quando observada por um observador na superfície Terrestre localizado no plano do Equador à latitude de 0° (Saraiva, 2010)

2.1.4 Recurso Solar

É do conhecimento comum, que a órbita de rotação da Terra em torno do sol é descrita como sendo elíptica e a Terra gira sobre si mesma em torno do seu eixo denominado eixo polar (Costa, 2011). O eixo polar encontra-se inclinado em 23,45° em relação à normal da órbita, estando evidenciada esta situação na Figura 2.5.

A declinação solar (δ) define-se como sendo o ângulo formado a partir do plano equatorial da Terra e a linha que une o centro do Sol ao centro da Terra. Para casos especiais como nos dias

de equinócios de Primavera como o Outono, tem o valor de 0° e o valor respectivo de 23,5° no solstício de Verão e cerca de -23,5° no solstício de Inverno, para o Hemisfério Norte.

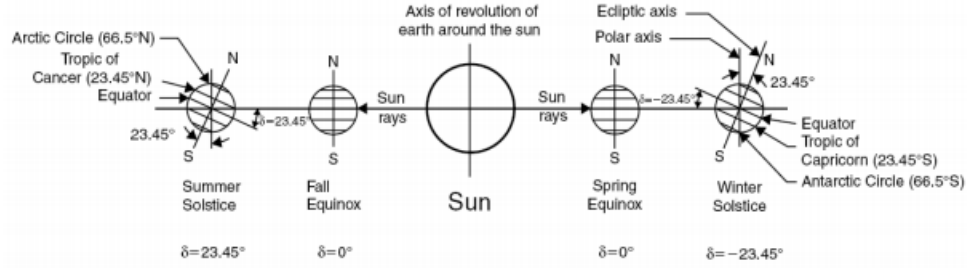


Figura 2.5: Variação anual da declinação solar (Kalogirou, 2009).

A declinação solar pode ser aproximada pela Eq. 1.

$$\delta = 23,5 \times \sin\left(\frac{360}{365}(dn + 284)\right) \quad \text{Eq. 1}$$

O ângulo do dia (Γ), sabendo que a variável temporal (dn) está referente aos dias julianos presentes em cada ano, expresso em radianos, pode ser calculado pela Eq. 2:

$$\Gamma = 2\pi \times \left(\frac{dn - 1}{365}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

A declinação solar (δ) pode ser calculada por uma outra aproximação mais rigorosa em que a variação máxima diária da declinação é de 0,5°, considerando um valor constante para cada dia. Então:

$$\delta = 0,006918 - 0,39912 \times \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \times \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma \quad \text{Eq. 3}$$

Também é necessário enumerar o conceito do ângulo solar horário (ω_s), que consiste na medida do deslocamento angular do Sol através da qual a Terra tem que girar para o meridiano Terrestre se situe diretamente debaixo do Sol (Costa, 2011). Por sua vez, este ângulo diminui desde o nascer do sol até meio dia solar onde toma o valor 0, começando depois a aumentar 15° de longitude por hora até ao final do dia solar. Consequentemente, no final do dia solar, o ângulo solar horário tomará o máximo valor positivo e no início do dia solar, tomará respectivamente o máximo negativo. Esta grandeza é expressa em graus, pode ser calculada por:

$$\omega_s = 15 \times (\text{hora local} - 12) \quad \text{Eq. 4}$$

Estas grandezas são relevantes para se poder determinar o ângulo de incidência dos raios solares ou zênite solar (θ_s) e em inglês como *Angle-Of-Incidence*, AOI, que consiste no ângulo formado entre a normal (vertical) da superfície e a direção dos raios solares, encontra-se ilustrado na Figura 2.6. Varia com a declinação (δ) e com a posição da órbita da Terra face ao Sol, é considerado um ângulo complementar ao ângulo que os raios solares realizam quando embatem na superfície terrestre, a altura solar. Concretamente para uma situação de não existência de atmosfera ou seja numa situação de ausência de refração dos raios solares, o ângulo de incidência para uma superfície horizontal pode ser calculado de acordo com a Eq. 5:

$$\cos \theta_s = \sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega_s) \quad \text{Eq. 4}$$

Ou

$$\theta_s = 90 - \alpha \quad \text{Eq. 5}$$

Onde a grandeza angular altura solar representada na Eq. 5 pela letra do alfabeto grego α , constitui-se como sendo complementar ao ângulo de incidência dos raios solares, sendo também variável com a duração do dia solar num ano, com a época do ano, com o clima local, bem como com a latitude (ϕ) do local .

Por sua vez, para uma superfície com determinada inclinação (β) e orientada para o Equador, o ângulo de incidência dos raios solares a uma latitude $\phi - \beta$ é determinado por:

$$\cos \theta_0 = \sin(\phi - \beta) \times \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega_s) \quad \text{Eq. 6}$$

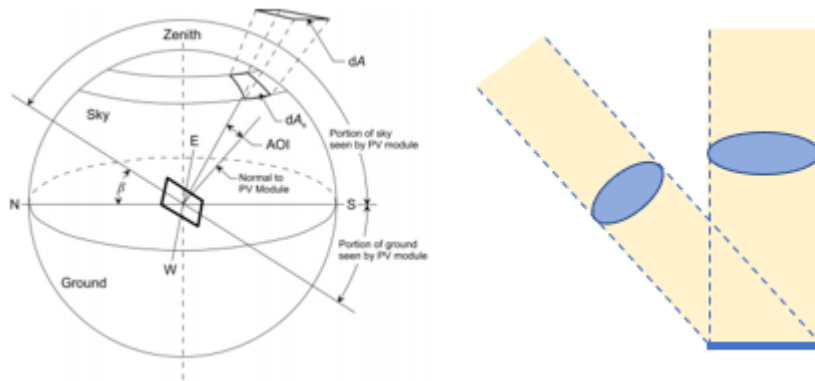


Figura 2.6: Efeito do ângulo de incidência dos raios solares em português vulgarmente designado por (θ) e em inglês como (*Angle-Of-Incidence*, AOI) na irradiância numa superfície com ou sem inclinação da mesma e ilustração quanto à seção que delimita este ângulo (Marion, 2007).

2.1.5 Irradiância Solar

“Maioritariamente a luz que ilumina o nosso planeta vem direta ou indiretamente do Sol. A luz do dia e a iluminação natural são radiações eletromagnéticas na região do visível que chega do Sol. Enquanto que a iluminação artificial, gerada em lâmpadas ou LED, é alimentada por energia que vem ou veio (num passado muito longínquo no caso dos combustíveis fósseis) do Sol” (Magarreiro, 2006).

Por conseguinte, para se avaliar o potencial da energia solar fotovoltaica em qualquer ponto da superfície Terrestre ou para projetar sistemas fotovoltaicos, interessa caracterizar a radiação solar que chega a cada sítio e em cada instante (Magarreiro, 2006). A radiação solar é variável com a época do ano, com a coordenada geográfica de latitude em qualquer ponto na superfície da Terra, com o clima local e com a hora do dia. Descreve-se por irradiância solar global a potência de radiação solar que incide numa superfície. Devido aos fenómenos atmosféricos verifica-se que existem atenuações na irradiância que atinge a superfície Terrestre (Magarreiro, 2006). A irradiância solar em sistema internacional é expressa em unidade de potência por superfície, em Wm^{-2} . Por sua vez, a radiação solar ou energia radiante considera-se como sendo a radiação solar que incide numa superfície colocada em qualquer coordenada geográfica na superfície Terrestre e num intervalo de tempo bem especificado. É definida em sistema internacional por Whm^{-2} .

A atenuação decorrida na quantidade de irradiância solar que chega à superfície Terrestre, é explicitada pelo o efeito dos fenómenos atmosféricos que condicionam a mesma. Torna-se necessário levar em consideração os diferentes fenómenos atmosféricos, em particular a dispersão e a absorção de luz nos gases e partículas atmosféricos, afectando de forma diferente os diferentes comprimentos de onda da radiação incidente (Magarreiro, 2006).

Consequentemente, um dos principais efeitos desses fenómenos consiste na alteração do ângulo de incidência de uma fracção dos raios solares. Significando então que a partir de um observador localizado em qualquer ponto da superfície Terrestre num plano horizontal, a totalidade da radiação solar que o atinge, atinge-o na forma de irradiância solar global no plano horizontal (*Global Horizontal Irradiance*, GHI). Constituí-se como sendo uma medida da energia solar em todos os comprimentos de onda por unidade de área incidente no topo da atmosfera da Terra. É calculada por:

$$GHI = DNI \times \cos \theta_s + DHI + \text{Albedo} \quad \text{Eq. 7}$$

A Eq. 7 demonstra por meio de uma equação a quantidade de irradiância solar global no plano (GHI), como sendo a totalidade da componente directa no plano horizontal, com DNI (irradiância normal directa) e com o ângulo de incidência dos raios solares (θ_s) mais a totalidade da componente difusa no plano horizontal (DHI) e mais a quantidade de irradiância que é refletida para o espaço sideral e que na equação se traduz pelo poder de reflexão de uma superfície (Albedo Terrestre).

A irradiância normal directa (em inglês *Direct Normal Irradiance*, DNI) ou irradiância de feixe é medida na superfície da Terra em qualquer local com uma componente normal à superfície da Terra e paralela à direcção dos raios solares. Exclui a radiação solar difusa e a refletida pelo solo.

A irradiância normal direta é igual à irradiância extraterrestre no topo da atmosfera menos perdas atmosféricas devido à absorção e dispersão. As perdas dependem da hora do dia (comprimento do caminho da luz na atmosfera de acordo com o ângulo da altura Solar), cobertura de nuvens, teor de humidade e outros conteúdos. A irradiância extraterrestre também varia com a época do ano (porque a distância da Terra – Sol também varia).

A componente direta na horizontal está representada na Eq. 7 com $DNI \times \cos \theta_s$, designando-se por irradiância direta horizontal (em inglês *Beam Horizontal Irradiance*, BHI) e genericamente constitui-se como a irradiância que vem diretamente da direção do disco solar, representada na Figura 2.7.

Ainda na Eq. 7, verifica-se a decomposição da irradiância global horizontal na difusa horizontal (*Diffuse Horizontal Irradiance*, DHI). No caso da componente difusa horizontal até incidir na superfície terrestre, sofre mudanças de direção devido às interações com a atmosfera Terrestre, como ilustrado na Figura 2.7. Em primeira aproximação, a componente difusa pode ser dividida em duas: uma componente isotrópica e uma componente circum-solar. Na componente isotrópica devido à interação com a atmosfera Terrestre a radiação é espalhada uniformemente no sentido atmosfera-solo. Enquanto que a componente circum-solar provém da aureóla solar, que se altera de acordo com o conteúdo de partículas atmosféricas (poluição, poeiras, nevoeiro) (Magarreiro, 2006). As diferenças entre estes tipos de irradiância difusa devem-se principalmente a dois tipos de dispersão que ocorrem na atmosfera: a dispersão de Rayleigh e a dispersão de Mie, que decorrem dependendo do tamanho e da forma das partículas que a luz encontra na sua passagem. Na dispersão de Rayleigh, a dispersão da radiação solar é caracterizada por partículas que são muito menores que o comprimento de onda da mesma ($\lambda \gg D$, em que D é a dimensão característica dos átomos ou moléculas na atmosfera). Significando que a radiação com menor comprimento de onda vai sofrer maior dispersão do que a com maior comprimento de onda, sendo posteriormente quer uma quer outra com as devidas diferenças dispersadas com igual intensidade em todas as direções, princípio este que origina a componente isotrópica da irradiância difusa. A dispersão de Mie é descrita pela dispersão de partículas com diâmetros semelhantes ao comprimento de onda da radiação solar ($\lambda \sim D$, gotas de água, cristais de gelo ou aerossóis) e o efeito que decorre é tanto maior, quanto maior o tamanho da partícula. Por isso, neste tipo de dispersão de partículas, a direção e sentido dos raios incidentes não depende do comprimento de onda da radiação, originando um brilho branco próximo do disco solar, brilho esse semelhante a uma aureóla solar, a partir da vista de um observador Terrestre (EARSel, 2020).

Por último, ainda na Eq. 7, a irradiância refletida pela superfície Terrestre quer tanto num plano horizontal ou não é designada por albedo. “Resulta da reflexão da radiação solar na superfície, dependendo portanto das propriedades óticas da superfície” (Magarreiro, 2006), conforme ilustrada na Figura 2.7. A contribuição do albedo é geralmente desprezável para superfícies horizontais.

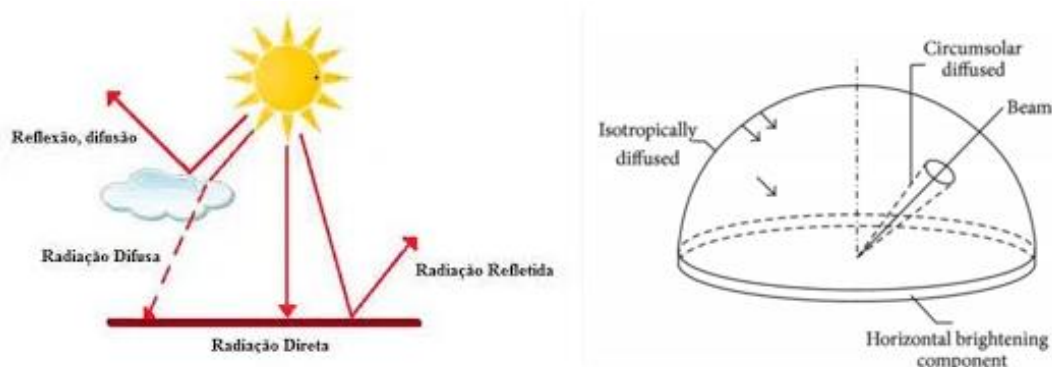


Figura 2.7: À esquerda esquema ilustrativo acerca das componentes constituintes da radiação global incidente na superfície Terrestre com plano horizontal (Tavares, 2014) e à direita a representação das componentes da irradiância difusa (Perez, 1987).

2.2 Medição de irradiância

“A medição da irradiância pode ser realizada em qualquer parte do globo com o objetivo de estudar as transformações de energia que ocorrem entre o sistema Terra-atmosfera e de que forma ocorre a distribuição da irradiância global (incidente normal à superfície, difusa e direta), analisar a constituição e as propriedades da atmosfera, validar as medidas de radiação feitas por satélites, além de satisfazer as necessidades de diversos setores, tais como: a meteorologia e a climatologia, a agricultura e a construção civil” (Guimarães, 2009).

As componentes da irradiância solar podem ser medida com recurso a sensores designados radiômetros, que tendo em conta a faixa espectral e o tipo de radiação medida (Guimarães, 2009), tendo em conta a respectiva calibração do sensor, denominam-se especificamente por piranómetros ou pireliómetros.

2.2.1 Medição da irradiância solar direta

2.2.1.1 Piranómetros

São instrumentos de medição da potência proveniente dos raios solares que incidem numa superfície com um ângulo sólido de 2π sr, frequentemente designada por irradiância solar global em Wm^{-2} , quer tanto as componentes direta como a difusa. Possuem um princípio de operação baseado na utilização de elementos maioritariamente do tipo termoelétrico, fotoelétrico ou fotovoltaico como sensores. Os modelos de piranómetros mais frequentemente utilizados são o de modelo de termopilha e o fotoelétrico ou fotovoltaico, embora respectivamente os de modelo fotovoltaico têm como desvantagem registo de dados menos precisos.

Os piranómetros de modelo de termopilha como exemplificados na Figura 2.9, operam com sensores térmicos, também designados como termopar, podendo estar várias termopilhas ligadas

em série ou em paralelo-série. Embora a construção deste tipo de sensores, seja diferente de fabricante para fabricante, o princípio fundamental se constitui aplicável a todos os modelos. Este modelo de piranômetros encontra-se preparado para responder a uma ampla faixa espectral de comprimento de onda do espectro solar, sendo que a amostragem dos registos de dados da irradiância solar global se constitui com elevada precisão, tendo que o sensor estar devidamente calibrado. Então, quanto à resposta espectral deste modelo de sensores de radiação solar, inclui uma faixa espectral de resposta entre 300 a 3000 nm, sendo possível observá-la na Figura 2.8:

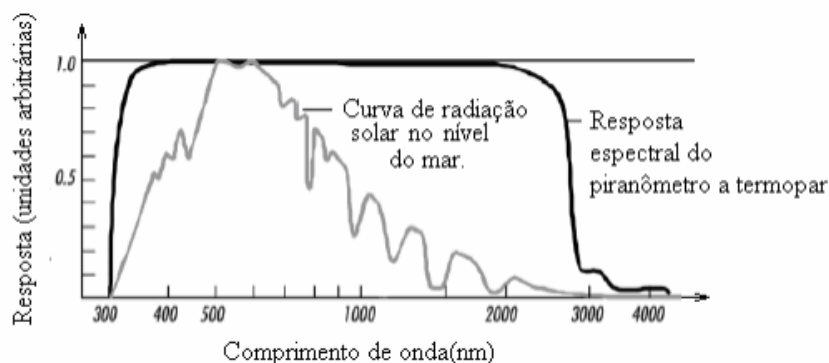


Figura 2.8: Resposta espectral da irradiância solar ao nível do mar e do piranômetro a termopar (Freire, 2008).

Este modelo de sensores de radiação solar, possuem na sua constituição elevadas quantidades de pilhas térmicas com múltiplos tipos de junções, termopares de cobre e constantan ligados em série. No interior do corpo do sensor, é onde está localizada a pilha térmica, constituída por material de alumínio. Face à exposição da radiação solar nas superfícies dos discos pintados a negro e a branco no domo ou cúpula interna, sendo estes elementos visíveis na Figura 2.9, verificar-se-á uma diferença de temperatura entre as duas superfícies com diferentes tipos de junções associados. Os termopares medem uma diferença de temperatura entre as superfícies dos discos pintados a negro e a branco. Através da diferença de temperatura entre as junções ativas (junções quentes, que estão por baixo da cúpula interna) associadas à superfície do disco pintado a negro e junções passivas (junções frias, que estão em contacto com o interior do piranómetro para uma temperatura constante) associadas à superfície do disco pintado a branco, na termopilha irá gerar-se uma corrente elétrica (IPMA, 2020).

As medições da temperatura gerada no sensor termopar, é facilmente afetada por fatores como o vento, chuva e dispersão de radiação solar. Devido a esses fatores, o sensor é protegido por duas cúpulas, constituídas por quartzo. As mesmas possibilitam a medição da irradiância solar global no plano do sensor. Outro constituinte é o dissecante, de gel de silício que é utilizado para prevenir o acumular de humidade associada a fenómenos de orvalho ou de geada no interior das cúpulas, podendo obstruir ou dispersar a radiação solar, pelo mecanismo de transferência de calor por convecção, reduz-se a diferença de temperaturas entre as duas superfícies e como tal afetar todo o funcionamento do sensor. Ainda se verifica a existência de um protetor de radiação, que protege o corpo do instrumento da radiação solar e que eventualmente também se pode constituir como ventilador acoplado à base para o maior controlo da temperatura e na manutenção do domo ou cúpula limpa. Na Figura 2.9, apresenta-se os detalhes construtivos de um piranómetro do modelo de termopilha.



Figura 2.9: Observação em recorte de um piranómetro do modelo de termopilha, e de todos os componentes, ainda outros constituintes como os discos negro e branco que pertencem respectivamente à cúpula interna e cúpula externa (Freire, 2008).

Conforme já foi referido, os piranómetros podem ser equipados com outros elementos de sensores como os fotoelétricos ou fotovoltaicos. Os piranómetros com este tipo de sensores, possuem na sua génese elementos de semicondutores de silício de junções P-N, sendo sensíveis a um comprimento de onda mais reduzido (do ultravioleta ao infravermelho), conforme observado na Figura 2.10 a resposta espectral associada a estes tipos de piranómetros e uma ilustração visual acerca do instrumento. O princípio de funcionamento consiste em utilizar um fotodíodo ou uma célula fotovoltaica, gerando-se uma corrente elétrica que é proporcional à irradiância que é recebida.

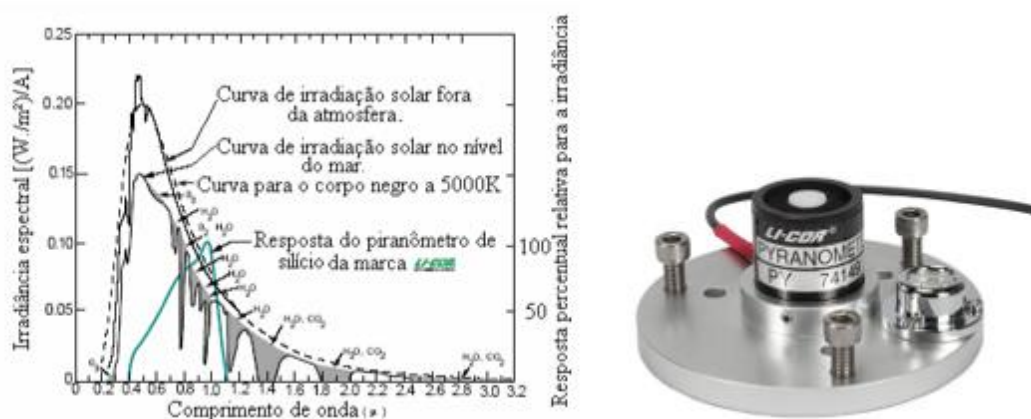


Figura 2.10: Curva de distribuição da resposta espectral da irradiância solar à esquerda e à direita um exemplo de um modelo de piranómetro do tipo de sensor fotovoltaico da marca LI-COR (Freire, 2008).

A partir da análise da Figura 2.10, verifica-se que o espectro solar total para os piranómetros com elementos de sensores fotoelétricos ou fotovoltaicos, encontra-se entre os 400 nm a 1100 nm. Podendo-se inferir que os piranómetros com elementos de sensores termoeletrônicos são mais precisos e tomados como padrão para as calibrações. A baixa precisão destes sensores com elementos sensores fotovoltaicos é explicada pela faixa espectral onde a fotocélula é sensível, sendo improvável a rectificação. Embora, o baixo custo dos piranómetros com elementos de sensores fotovoltaicos em relação aos com elementos de sensores termoeletrônicos, possuem uma tensão de saída elétrica numa ordem de grandeza superior aos de sensores termoeletrônicos e um tempo de resposta quase instantâneo face a variações verificadas na radiação solar de forma quase instantânea. Tornando estes instrumentos particularmente úteis em aplicações de medição da radiação solar, como piranómetros secundários, permitindo interpolações de estações que possuem piranómetros termoeletrônicos ou para a detecção de rápidas flutuações na radiação solar.

Ao longo deste trabalho prático o modelo de instrumento utilizado para medições de irradiância solar foi um piranómetro com elementos de sensor termoeletrico da marca EKO, o modelo MS-802 com número de série F14005R.

2.2.1.2 Pireliómetro

Consiste num instrumento de medição da irradiância solar direta normal com incidência normal à superfície (DNI), ilustrado na Figura 2.11. Neste equipamento, o espectro da luz solar situa-se entre 200 e 4000 nm, tornando este instrumento apto para medições da irradiância solar direta com a melhor qualidade. Também possui um principio construtivo principalmente com elementos de sensores tanto termoeletricos como com fotoeletricos ou fotovoltaicos. No caso com elementos de sensores termoeletricos a DNI entra através de um pequeno orificio, que deve estar diretamente apontado para o Sol, sendo depois direcionada para uma termopilha que converte a energia absorvida sob a forma de calor num sinal elétrico. Enquanto, com elementos de sensores fotoeletricos ou fotovoltaicos o principio de operação é semelhante com o verificado nos piranómetros da mesma categoria de elementos sensores.

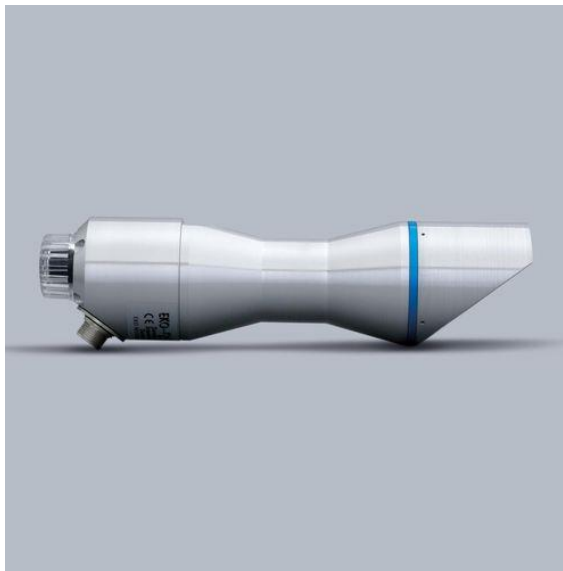


Figura 2.11: Exemplificação de um pireliómetro (kintech engineering, 2020).

2.2.2 Medição da radiação difusa

A medição da irradiância difusa é realizada através de um piranómetro podendo ser descrita por duas opções: com recurso a um seguidor solar com uma esfera de sombreamento acoplada ou com um anel de sombreamento acoplado ao piranómetro, ilustrados na Figura 2.12. Na primeira opção a esfera é acoplada ao seguidor solar automático, que acompanha a posição do Sol, sombreando o sensor do piranómetro.

No caso do anel ou banda de sombreamento, em forma de aro ou semiaro, acoplado junto do piranómetro, desta forma “bloqueando o Sol no caminho que percorre ao longo do dia solar”(Angioletti, 2019). Verificar-se-á um ajustamento manualmente de acordo com a latitude e onde está localizado o parque solar fotovoltaico (Angioletti, 2019), tendo em consideração a declinação solar ao longo do ano. Então, esse ajustamento será realizado várias vezes no decurso dos meses ao longo do ano, devido em parte ao bloqueamento que se verifica da banda de sombreamento bloquear para determinados ângulos e em conjunto com a variação da declinação solar ao longo do ano, é de todo necessário corrigir a posição da banda de sombreamento.



Figura 2.12: Respectivamente à esquerda uma exemplificação de uma esfera de uma sombreamento acoplado ao seguidor solar , à direita um anel ou banda de sombreamento fixado junto à estrutura que engloba um piranómetro (kintech engineering, 2020).

3. Métodos

O desenvolvimento do modelo da distribuição geográfica do erro associado ao ângulo de incidência é realizado em passos crescentes de complexidade, primeiro considerando valores modelados de radiação no topo da atmosfera e depois de radiação direta na superfície terrestre. A validação experimental é realizada por análise dos dados de irradiação solar na estação de medida de radiação solar no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

3.1 Modelos

3.1.1 Irradiância Solar no topo da atmosfera para uma superfície horizontal

A irradiância solar no topo da atmosfera E_0 , também designada por irradiância extraterrestre, consiste na irradiância que é recebida pela superfície terrestre considerando a ausência de atmosfera, dependendo essencialmente da latitude do local, da hora, e do dia juliano. Será maior na região equatorial e menor nas regiões polares (latitudes altas). Pode ser calculada através da Eq. 8:

$$E_0(t)[Wm^{-2}] = E_{SC}[Wm^{-2}] \times (R^{-2}) \times \cos(AOI(t)) \quad \text{Eq. 8}$$

Com R que representa a relação matemática associada ao raio heliocêntrico da Terra em UA, E_{SC} constante média de irradiância solar global num ano e assume o valor de $1367 [Wm^{-2}]$ e AOI o ângulo de incidência dos raios solares na superfície em análise. O valor R foi estimado através do algoritmo SG2 (*Solar Geometry*) (Blanc, 2012). Importa referir ainda que para superfícies planas o AOI é equivalente ao zénite solar.

Para estimar o erro de medição associado os valores de E_0 calculados para um dado período de tempo e um dado local, pode-se ter em conta o perfil de erro de medição em função do ângulo de incidência do sensor de medição da irradiância solar em questão. Para este trabalho em questão considerou-se o perfil de resposta direccional dos piranómetros MS-802 com número de série F14005R da marca EKO (*EKO INSTRUMENTS CO., LTD*), ilustrado no primeiro gráfico na Figura 1.5, sendo este o modelo que está instalado na estação meteorológica no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*.

Foi possível, portanto, determinar o erro de medida associado à radiação extraterrestre em função da latitude para todas as horas do ano. Mais relevante do que o erro horário, é estimar o efeito global da latitude no erro de medida, por exemplo através da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) (Eq. 9).

$$RMSE[Wm^{-2}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \epsilon^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_0 \times X)^2}{N}} \quad \text{Eq. 9}$$

ε^2 representa a totalidade das incertezas relativas dos sensores na irradiância solar, E_0 representa a irradiância solar global extraterrestre, X representa as incertezas relativas dos sensores ao longo do tempo e N representa o número total de dados da amostra.

Por sua vez, para uma melhor avaliação dos resultados obtidos, pois devido aos erros de maior proporção obtidos aquando na soma, poderem causar acréscimos nos valores de RMSE. Consequentemente, os RMSE calculados para cada local foram normalizados pelo valor médio anual de radiação extraterrestre correspondente (Eq. 10). Esta métrica é designada por nRMSE (*normalized Root Mean Squared Error*).

$$nRMSE [\%] = \frac{RMSE}{\overline{E_0}} \times 100 \quad \text{Eq. 10}$$

$\overline{E_0}$ representa o valor médio anual da irradiância solar global extraterrestre.

3.1.2 Irradiância solar para céu limpo

A abordagem anterior permite uma análise preliminar que considera apenas o impacto da latitude no erro de medição que resulta do ângulo de incidência. No entanto, é importante considerar também o impacto da atmosfera na irradiância que chega à superfície. Por um lado, parte da irradiância é absorvida pelos aerossóis; por outro, parte da radiação é difundida. No entanto, a componente difusa é insensível ao erro do ângulo de incidência, visto ser, em primeira aproximação, isotrópica.

Primeiro, procedeu-se à avaliação do impacto de uma atmosfera limpa, considerando valores de irradiância direta para céu limpo (BHIc, de beam horizontal irradiance e clear-sky). Visto não ser uma variável mensurável, a radiação direta para céu limpo foi estimada através do modelo de Ineichen (Eq. 11).

$$BHI[Wm^{-2}] = E_0 \times \left(0.664 + \frac{0.163}{e^{\left(\frac{-h}{8000}\right)}} \right) \times e^{\left(-0.09 \times \frac{1}{\cos(AOI)} \times (T_L - 1)\right)} \quad \text{Eq. 11}$$

onde h representa a altitude relativa ao nível do mar, em metros, do local em estudo

Ao contrário de outros modelos que necessitam de um conjunto alargado de parâmetros meteorológicos específicos, este modelo empírico recorre a estimativas de turbidez atmosférica de Linke (TL) e à latitude do local. Este parâmetro é um indicador da espessura ótica da atmosfera limpa, devido à dispersão de partículas de aerossóis e à absorção de vapor de água (Gomes, 2007). Os valores de TL considerados foram obtidos através de uma plataforma web disponibilizada pela empresa SoDa - Solar Data (SoDa, 2020). Estes dados correspondem a valores mensais de TL mapeados para o mundo inteiro com uma resolução próxima de 10 km. Foram, portanto, considerados os valores para o par de coordenadas mais próximo do local aqui em análise.

A avaliação da distribuição geográfica do nRMSE é igualmente avaliada com estes dados.

3.2 Irradiância solar à superfície – avaliação experimental

Os resultados obtidos através de dados modelados (de irradiância extraterrestre ou irradiância direta para céu limpo) foram validados através de medições reais de irradiância na estação meteorológica no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*.

3.2.1 Equipamentos

No topo do edifício C1 da FCUL está instalada desde Janeiro de 2019 uma estação de medição de radiação solar, ilustrada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Estação meteorológica no topo do edifício C1 na FCUL

Neste local estão colocados três sensores diferentes (Figura 3.3): um pireliómetro MS-56 e dois piranómetros EKO MS-802 com número de série F14005R, sendo que um dos dois está constantemente sombreado. O pireliómetro, no canto inferior esquerdo da imagem, mede a radiação direta no plano normal (DNI, de *Direct Normal Irradiance*), estando este sensor permanentemente alinhado com o Sol através de um seguidor. Por outro lado, o piranómetro mais ao centro da imagem é responsável por medir a irradiância global incidente no plano horizontal (GHI), enquanto que o mais próximo do canto inferior direito é sombreado por uma esfera de forma a medir apenas a radiação difusa que chega ao plano horizontal. Ambos os piranómetros são classificados como *Secondary Standard*, segundo a norma internacional *ISO9060* e funcionam de acordo com o princípio da termopilha: gera-se uma pequena diferença de potencial proporcional à irradiância absorvida pelo sensor.



Figura 3.2: Disposição e organização dos equipamentos na estação meteorológica da FCUL

Consecutivamente, a estação recolhe dados de irradiância direta no plano normal, difusa e global no plano horizontal. Na tabela, encontra-se de forma sucinta as especificações quanto aos sensores de radiação solar existentes.

Tabela 3.1: Especificações sensores de radiação solar (Pereira, 2015)

<i>Equipamentos</i>	<i>Registo de medições</i>	<i>Unidades de medida SI</i>	<i>Especificações</i>	
<i>Piranómetros EKO MS-802 número de série: F14005R</i>	GHI, DHI	Wm^{-2}	Resposta espectral	285 – 2800 nm
			Resposta à irradiância	0 – 1400 Wm^{-2}
			Campo visual	180 °
			Incerteza	0,66%
<i>Pireliómetro MS-56</i>	DNI	Wm^{-2}	Resposta espectral	200 – 4000 nm
			Resposta à irradiância	0 – 2000 nm
			Campo visual	$\pm 2,5$ °
			Incerteza	0,69%

Por último, os dados são recolhidos a cada minuto, armazenados num *datalogger* e enviados para um PC.

3.2.2 Estimativa do erro do AOI

A estimativa do erro de AOI nas medidas de GHI na estação parte do princípio que:

- A medida da DNI não é sensível ao AOI porque o pireliómetro está colocado num seguidor solar que acompanha o movimento aparente do sol no céu;
- A medida da irradiância difusa no plano horizontal (DHI) não é sensível ao AOI porque é, em primeira aproximação, isotrópica, e por isso não depende da posição do Sol;
- A medida da irradiância global no plano horizontal (GHI) é sensível ao AOI.

Assim sendo, o efeito do AOI, em termos relativos, pode ser estimado calculando o chamado “erro de fecho”, dado pela Eq. 12:

$$Erro_{fecho} = \left| \frac{GHI - (BHIC + DHI)}{GHI} \right| \times 100$$
$$BHIC = DNI \times \cos(\alpha)$$
Eq. 12

Esta abordagem apresenta algumas limitações, nomeadamente a assunção de que:

- O erro de fecho se deve apenas ao efeito de AOI, negligenciado outros efeitos como diferenças de temperatura, sujidade, etc;
- A DHI é totalmente isotrópica, não correspondendo à realidade na generalidade das circunstâncias, observando-se componentes angulares como o efeito circunsolar ou o efeito do horizonte brilhante (Perez, 1987)

De seguida, é necessário novamente calcular o RMSE associado ao erro de fecho da estação meteorológica, através da Eq. 13. Tal como nos casos anteriores, este erro foi normalizado de forma a obter o nRMSE em percentagem.

$$RMSE[Wm^{-2}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Erro_{fecho}^2}{N}}$$
Eq. 13

Por último serão comparados ambos os modelos para a mesma localização geográfica associada ao caso de estudo da estação meteorológica.

4. Resultados

4.1 Distribuição geográfica AOI

Os resultados obtidos serão visualizados a partir da distribuição geográfica do RMSE tanto para a irradiância solar extraterrestre como para a componente direta com céu limpo obtida pelo modelo.

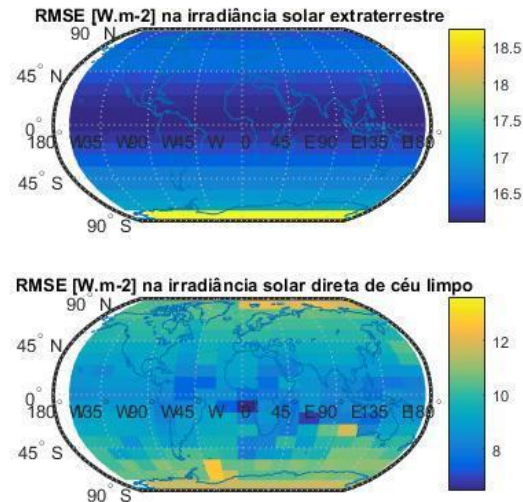


Figura 4.1 RMSE quanto à incerteza de medição estimada para um piranômetro EKO MS-802 com número de série F14005R colocado num plano horizontal. Foram considerados dados de irradiância extra-terrestre (figura de cima) e de irradiância direta para céu limpo (figura de baixo).

Em ambos os mapas da Figura 4.1, se verifica valores obtidos superiores para latitudes mais elevadas. Esta dependência com a latitude era expectável porque para maiores latitudes a altura média do sol é mais baixa. De modo a analisar-se esta dependência, apresenta-se na figura 4.2, um histograma de frequências da altura solar para três coordenadas geográficas de latitude distintas respectivamente, 0, 45, 90°.

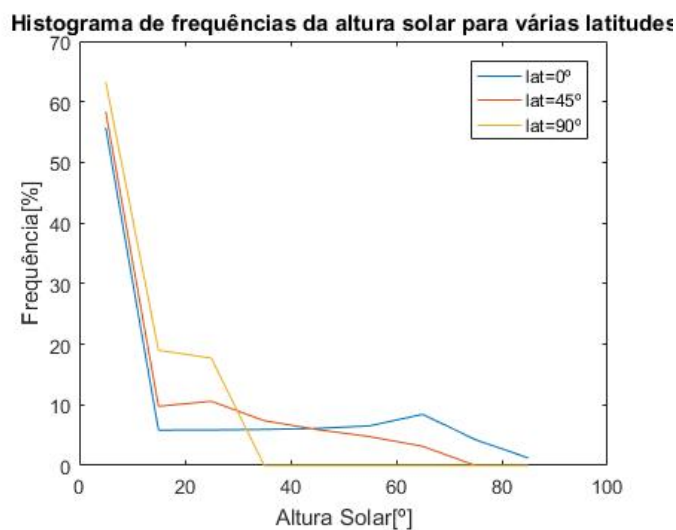


Figura 4.2: Histograma de frequências da altura solar para diferentes latitudes.

Nesta Figura 4.2, é possível observar que alturas solares mais baixas são frequentes a todas as latitudes (de madrugada e no crepúsculo). No entanto, se no equador a frequência de alturas solares se estende até aos 90° (zénite), para latitudes superiores (e.g. 45°) a frequência vai diminuindo até atingir a altura solar máxima do local (neste caso cerca de 75°). Para latitudes mais elevadas o efeito é ainda mais marcado; nos polos, a altura solar máxima não chega a 40°.

A variação do erro do AOI para o modelo da radiação extraterrestre depende apenas da latitude do local. Por sua vez, as estimativas de irradiância direta para céu limpo varia principalmente com a latitude mas também depende da longitude. Isto justifica-se pelo facto de os valores de T_L representarem a turbidez da atmosfera em céu limpo para cada local.

A introdução da atmosfera para céu limpo, através do modelo de Ineichen, leva a uma esperada redução do erro de AOI porque parte da radiação é dispersa tornando-se, numa primeira aproximação, isotrópica e, portanto, sem impacto no erro de AOI. No entanto, e apesar do menor RMSE, a variação espacial é consideravelmente maior.

Então é possível constatar que o RMSE para radiação direta para céu limpo é de 9,3 Wm⁻² para a localização do caso de estudo, Portugal.

Na figura seguinte é ilustrada a distribuição geográfica do nRMSE, onde o erro absoluto é normalizado pelo recurso solar médio de cada local. Verifica-se que a normalização do erro torna mais clara a dependência do mesmo com a latitude. Atendendo à localização do caso de estudo, o valores de nRMSE para a irradiância direta para céu limpo é de 1,3 %.

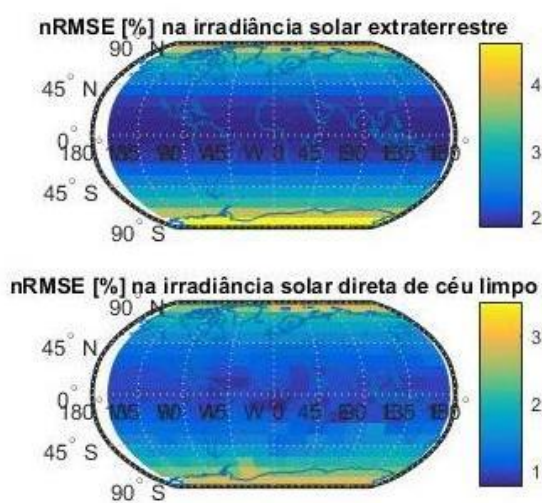


Figura 4.3: nRMSE [%] quanto à incerteza de medição estimada para um piranómetro EKO MS-802 com número de série F14005R colocado olocado num plano horizontal. Foram considerados dados de irradiância extra-terrestre (figura de cima) e de irradiância direta para céu limpo (figura de baixo).

4.2 Validação Experimental

Como descrito na secção 3.2 na estação solar no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, a partir dos sensores de radiação solar são registadas medições da irradiância solar global num plano horizontal, quer tanto as suas componentes directa para céu limpo e a difusa, com uma amostragem de minuto a minuto. Neste estudo, foram considerados dados de Fevereiro a Dezembro de 2019.

Para melhor visualizar o padrão anual nestes dados, estes foram convertidos para uma amostragem diária, conforme ilustrado na Figura 4.4. Pode-se observar uma grande variabilidade na amostragem, como esperado, com valores de irradiância solar horizontal maiores no Verão e menores nos dias de Inverno, estando associado ao facto da presença ou ausência de nuvens correspondentes na maioria dos dias associados a essas estações do ano.

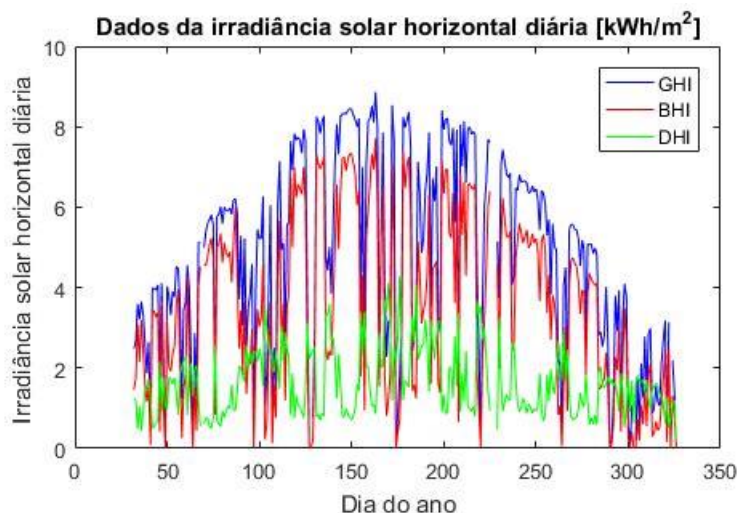


Figura 4.4: Registo de dados de GHI,BHI,DHI para o período de dados correspondendo em calendário juliano desde o dia 32 até ao dia 326, obtidos no Laboratório de Energia Solar da *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

Por sua vez, a partir dos dados originais (amostragem minuto a minuto) é possível determinar o erro de fecho. Este erro conforme abordado na secção 3.2.2, consiste na diferença entre a irradiância global medida e a irradiância global estimada a partir de medições da irradiância directa e difusa.

Na Figura 4.5 é possível observar a distribuição do erro de fecho ao longo dos meses do período de dados. Para cada mês está representado um diagrama de caixa, com o limite superior e inferior do mesmo a indicar, respectivamente, o 1º e 3º quartis e a linha horizontal a vermelho correspondendo à mediana da distribuição. Os marcadores a vermelho indicam os valores discrepantes (*outliers*) do erro de fecho. Com base nos critérios utilizados para a elaboração de um gráfico boxplot, considera-se um valor de *outlier* quando um valor está a uma distância maior de 1,5 vezes do intervalo de interquartil quer tanto da parte superior do diagrama de caixa ou da parte inferior.

Para os vários meses do ano a mediana do erro de fecho é de 4,03% um valor que confere alguma robustez à qualidade das medidas. Aparenta ainda haver uma tendência com o erro a aumentar ligeiramente nos meses de Verão e Outono. É também possível detetar um conjunto de outliers, concretamente nos meses de Fevereiro, Março e Junho. Esse conjunto de outliers, que estão localizados acima do diagrama de caixa, representam períodos de tempo, onde os erros de fecho são maiores e onde se verifica com maior expressão o efeito do AOI.

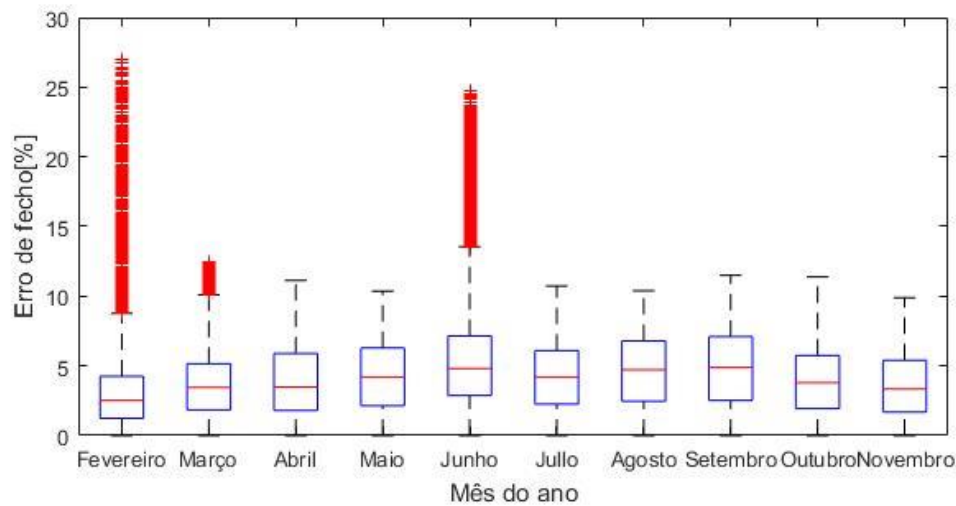


Figura 4.5: Distribuição percentual do erro de fecho ao longo do período da amostragem

É também interessante visualizar a distribuição do erro de fecho em função da altura Solar (o ângulo complementar ao AOI de uma superfície horizontal), tal como se pode verificar na Figura 4.6. É possível observar que, abaixo dos 40°, a mediana do erro aumenta à medida que a altura Solar diminui (i.e. o ângulo de incidência aumenta). No entanto, verificam-se também outliers para valores de altura Solar acima dos 80°.

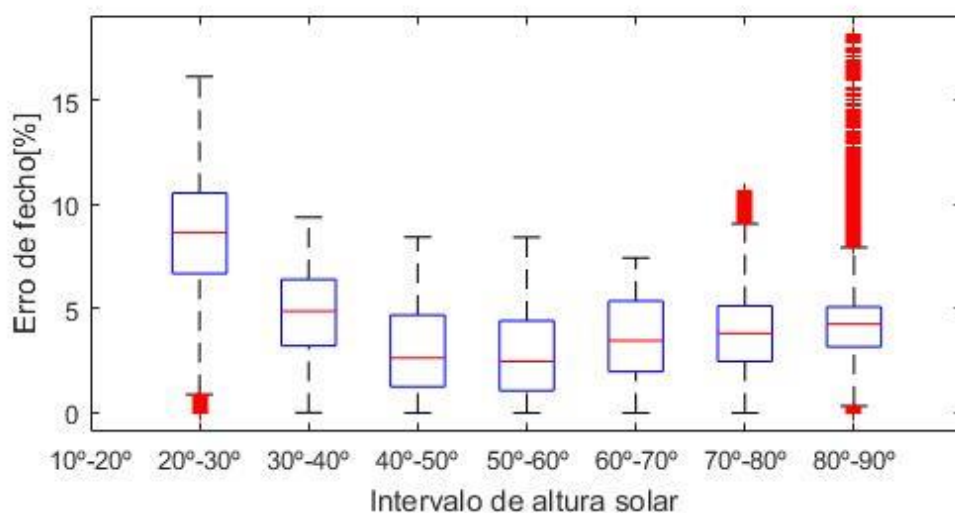


Figura 4.6: Distribuição percentual do erro de fecho em função dos intervalos dos ângulos de altura Solar.

Estes resultados aparentam validar a hipótese de que o erro de fecho constitui uma boa variável *proxy* relativamente ao erro do AOI ilustrada na Figura 4.7 que se visualiza a sobreposição da mediana do erro de fecho e do histograma de frequência em função do AOI para a localização do caso estudo em Lisboa, para os vários meses do ano com a função erro do sensor utilizado, no primeiro gráfico na Figura 1.5.

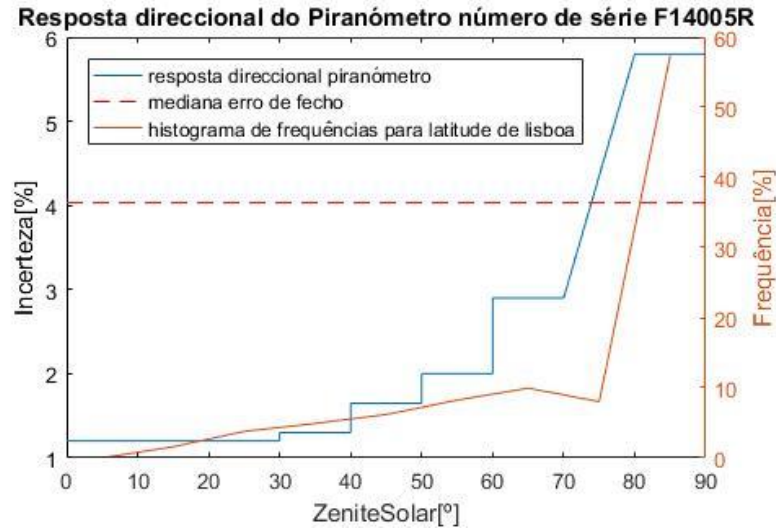


Figura 4.7: Sobreposição da mediana do erro de fecho e do histograma de frequências em função do AOI para a latitude da estação solar, para os vários meses dos anos com a função erro que ilustra a resposta direccional do piranómetro face ao efeito do AOI

A partir da análise da Figura 4.7, se mostra que a magnitude do erro do fecho é da ordem de grandeza da incerteza introduzida pelo AOI, corroborando que o erro de fecho é sobretudo dominado pelo efeito do AOI.

Assim, e tal como foi referido anteriormente na secção 3.2.2, determinou-se o RMSE e nRMSE para o erro de fecho verificado ao longo do período de dados. O resultado foi bastante similar ao obtido através das estimativas de radiação direta para céu limpo, com um nRMSE de 0.93 % (sendo que os valores modelados resultaram num nRMSE de 1,3%).

Embora se possa considerar que o objetivo quanto ao procedimento experimental se encontre cumprido, é possível afirmar que as pequenas diferenças nos resultados em comparação com o modelo de da irradiância direta de fecho em que foi utilizado o modelo de Ineichen, se devem concretamente aos parâmetros necessários para o próprio modelo ser aplicado assim como a existência de outras fontes de incerteza nos procedimentos experimentais, como o efeito da temperatura, possíveis desalinhamentos, sombreamentos, etc.

4.3 Discussão

O procedimento experimental deste trabalho permitiu validar a hipótese, aqui colocada, de que o erro de fecho constituía uma boa variável *proxy* relativamente ao erro de AOI. Para isso, foram comparados os erros calculados através de valores de radiação solar medidos em Lisboa com estimativas teóricas do erro de AOI utilizando valores calculados de irradiância extraterrestre e irradiância direta para céu limpo. Nesse modelo teórico a componente difusa não é direccional (porque é isotrópica) e por isso não é relevante para a incerteza AOI. Deve notar-se que o primeiro modelo da irradiância solar, vista num plano horizontal no topo da atmosfera, só é útil para se observar a distribuição geográfica do erro de AOI sem o efeito da atmosfera Terrestre, enquanto o segundo modelo, que considera a radiação direta, inclui os efeitos da latitude e do clima.

Para o objetivo de estudo desta dissertação ter sido realizado com sucesso tornou-se conveniente relevar a importância do caso de estudo da estação meteorológica no *Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, localizada junto da central de geração fotovoltaica nos telhados do edifício C1. Como é frequente em parques solares de alguma dimensão, trata-se de um exemplo de uma situação em que a medida de irradiância solar pode ser utilizada para avaliar o desempenho da central de geração fotovoltaica podendo, em situações de discrepância, identificar atempadamente falhas de produção, maximizando os proveitos da venda, ou consumo, da energia solar. Neste exemplo, como em outras situações como a avaliação do potencial de um dado projeto ou região, ou até a previsão de geração no futuro (*forecasting*), a incerteza na medida da irradiância solar vai prejudicar a qualidade da avaliação do potencial ou produção solar.

Para se minimizar esta fonte de incerteza, a GHI deve ser estimada enquanto soma de medições de um piréliómetro (radiação direta) e, por exemplo, um piranómetro com uma bola de sombra (radiação difusa). O pireliómetro, porque está acoplado a um seguidor, não é afetado pela incerteza resultante do AOI; por outro lado, a radiação difusa é uma medida pouco sensível ao AOI, devido à sua natureza menos anisotrópica. Mas naturalmente, esta opção é mais dispendiosa em termos financeiros face à de medir a irradiância solar global horizontal, pois exigirá a existência de dois sensores de radiação, sendo que o pireliómetro é um equipamento bastante mais dispendioso e que exige mais manutenção. Por último também seria possível enumerar outra opção ainda mais simples que seria colocar o piranómetro num plano inclinado. Esta solução é adequada para a avaliação e previsão do desempenho de uma central solar existente mas é menos útil para a avaliação do potencial, pois restringe a flexibilidade na inclinação dos módulos fotovoltaicos a instalar.

5. Conclusões e trabalho futuro

Ao longo desta dissertação foi possível observar que o efeito do AOI constituiu-se como uma fonte de incerteza relevante para a medida de irradiância solar numa superfície horizontal.

A análise geográfica da incerteza associada ao ângulo de incidência no topo da atmosfera revelou o impacto relevante da latitude do local com uma variação entre 16,5 e 18,5 Wm^{-2} ao longo de um ano, entre o equador e os polos, respectivamente, que corresponde a 2 e 4,5 % respectivamente.

Quando se considera o efeito da atmosfera, em particular em dias de céu limpo quando o erro introduzido na medida é mais relevante – pois nessas condições a maior fração da energia solar é a sua componente direta – o efeito da incerteza na medida da irradiância, numa superfície horizontal, é menor em 22%, em média. A sua variação geográfica ainda é afectada pela latitude mas, naturalmente, também vai depender do clima local. A incerteza varia entre 7 e 13 Wm^{-2} ao longo de um ano, entre o equador e os polos, respectivamente, que corresponde a 1 e 3,5% respectivamente.

O modelo foi validado experimentalmente considerando medidas de irradiância global, direta e difusa, registadas na estação de medida do Campus Solar na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, no período de Fevereiro a Dezembro de 2019. Para o efeito considerou-se que o erro de medida associado ao ângulo de incidência poderia ser estimado calculando a diferença entre as medidas de irradiância global na horizontal (afectadas pela incerteza) e irradiância global na horizontal calculada a partir das medidas de irradiância direta no plano normal e irradiância difusa no plano horizontal. A esta diferença é habitual chamar-se erro de fecho. Embora esta aproximação considere que a radiação difusa é isotrópica, os resultados experimentais mostraram ser uma boa estimativa do erro associado ao ângulo de incidência pois a sua variação com a altura solar apresenta o mesmo comportamento. Quantitativamente, observou-se uma incerteza anual no erro de fecho da ordem de 0,93%, compatível com os resultados do modelo. As diferenças são justificadas pelas condições meteorológicas particulares durante o período da análise. Seria de esperar que as diferenças diminuam quando se considerarem séries temporais mais longas (i.e. vários anos), diluindo as variações interanuais no recurso solar.

A redução do efeito da resposta angular dos piranómetros nas medidas de irradiância solar pode ser conseguido no desenvolvimento de piranómetros que introduzam menor incerteza, por exemplo com um processamento de sinal que corrija o efeito do ângulo de incidência. Entretanto, recomenda-se a medição da irradiância no plano inclinado onde os módulos fotovoltaicos vão ser instalados (em alternativa a realizar medidas no plano horizontal e depois aplicar um modelo de transposição) já que o plano inclinado óptimo para o local minimiza o ângulo de incidência. Esta abordagem tem o inconveniente de obrigar a medidas de irradiância para cada projeto em vez da possibilidade de usar uma rede de estações de medida (relevantes para outras aplicações). Uma outra opção é naturalmente a estimativa da irradiância global a partir de medidas independentes das suas componentes diretas e difusa que, como vimos, são pouco sensíveis ao ângulo de incidência. Esta opção é mais cara do que o uso de apenas um piranómetro no plano horizontal.

Relativamente a desenvolvimentos futuros, a validação dos modelos devia ser realizada em locais com diferentes latitudes e clima, e para períodos mais longos, de forma a diluir a variabilidade interanual.

Por outro lado, também seria interessante explorar as variações sazonais, ou mesmo diárias, do efeito do ângulo de incidência na incerteza da medida da irradiância.

No caso particular da estação de medida de irradiância solar no Campus Solar, seria interessante explorar outras fontes de erro nas medidas, como por exemplo temperatura, luz reflectida, sombreamentos ou desalinhamentos nos seguidores solares.

6. Referências

- (Angioletti, 2019), “Medição da radiação solar”, *Siemens Energy*. [Online]. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/medi%C3%A7%C3%A3o-da-radia%C3%A7%C3%A3o-solar-thiago-angioletti-licio/?originalSubdomain=pt> [Accessed: 02 09 2020];
- (Blanc, 2012), “The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period”, *Centre Energétique et Procédés*. [Online]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12002800> [Accessed: 25 06 2020];
- (Costa, 2011), “Comparação de métodos de seguimento solar para sistemas fotovoltaicos”, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. [Online]. Available at: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/8701?locale=en> [Accessed: 12 05 2020];
- (EARSel, 2020), “Introdução ao sensoriamento remoto”, *European Association of Remote Sensing Laboratories*. [Online]. Available at: <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p04.pt.html> [Accessed: 03 06 2020];
- (EKO, 2018), “MS-802 pyranometer”, EKO. [Online]. Available at: <https://eko-eu.com/products/solar-energy/pyranometers/ms-802-pyranometer> [Accessed: 30 04 2020];
- (Freire, 2008), “Desenvolvimento de um piranómetro fotovoltaico”, *Universidade Federal de Pernambuco*. [Online]. Available at: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9779> [Accessed: 30 04 2020];
- (Gomes, 2007), “Modelo de Linke Para A Estimativa Da Radiação Direta na Incidência”, *Congresso Brasileiro de Energia Solar e Associação Brasileira de Energia Solar*. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283215630_MODELO_DE_LINKE_PARA_A_ESTIMATIVA_DA_RADIAAO_DIRETA_NA_INCIDENCIA [Accessed: 30 06 2020];
- (Guimarães, 2009), “Avaliação de um simulador solar para calibração indoor de piranómetros”, *Congresso Brasileiro de Metrologia*, pp. 1. [Online]. Available at: http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/11.23.17.53.54/doc/Guimar%C3%A7es_Avalia%C3%A7%C3%A3o.pdf [Accessed: 28 04 2020];
- (Incropera, 2011), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Seventh Ed, Willey;
- (IPMA, 2020), “Área educativa – radiação solar global”, *Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)*. [Online]. Available at: <http://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=ema.rad.solar.xml> [Accessed: 20 06 2020];
- (IRENA, 2019), “Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (a global energy transformation: paper)”, *International Renewable Energy Agency (IRENA)*. [Online]. Available at: <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic> [Accessed: 21 04 2020];

(Kalogirou, 2009), *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Elsevier;

(kintech engineering, 2020), “Pireliómetro CHP1”. [Online]. Available at: <https://www.kintech-engineering.com/pt-br/products/solar-pt/chp1-pyrheliometer/> [Accessed: 04 09 2020];

(Kipp & Zonen, 2020), “CMP 21 Pyranometer”. [Online]. Available at: <https://www.kippzonen.com/Product/14/CMP21-Pyranometer#.X72Np2j7TIU> [Accessed: 01 05 2020];

(Magarreiro, 2006) “Radiação e Energia Solar”, *Instituto Dom Luiz – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, pp. 57 – 59, vol. 39, n. 1/2 .[Online], Available at: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf> [Accessed: 06 06 2020];

(Marion, 2007), “Numerical method for angle-of-incidence correction factors for diffuse radiation incident photovoltaic modules”, *NREL*, pp. 3. [Online], Available at: <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1350025> [Accessed: 23 05 2020];

(Masson, 2013), “Global market outlook for photovoltaics 2014-2018”, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*. [Online]. Available at: <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018> [Accessed: 20 04 2020];

(Morais, 2009), *Sistemas Fotovoltaicos - da Teoria à Prática*, Engebook;

(Pereira, 2015), “Avaliação de desempenho de protótipo de seguimento solar passivo biaxial”, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, pp. 38 . [Online]. Available at: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/20163> [Accessed: 20 08 2020];

(Perez, 1987), “A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces”, *Sol. Energy*, vol. 39;

(Quaschnig, 2003), “The Sun as an Energy Resource - Technology Fundamentals”, *Renewable Energy World*, pp. 90 – 93. [Online]. Available at: http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index_e.php. [Accessed: 01 05 2020];

(Saraiva, 2010), “Movimento anual do Sol e estações do ano”. [Online]. Available at: http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_movsol.htm [Accessed: 12 05 2020];

(Silva, 2010), “Um Modelo Para o Movimento Anual Aparente Do Sol”, *Universidade de Caxias do Sul*. [Online]. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5165839.pdf> [Accessed: 07 05 2020];

(SoDa, 2020), “Linke turbidity factor”, *Solar radiation Data*. [Online]. Available at: <http://www.soda-pro.com/help/general-knowledge/linke-turbidity-factor> [Accessed: 01 07 2020];

(Tavares, 2014), “Geração heliotérmica: avaliação do impacto da utilização de novos fluidos no custo da energia gerada”, *Universidade Federal de Rio de Janeiro*. [Online]. Available at: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010098.pdf> [Accessed: 15 06 2020];

(Wikipedia, 2020), “Gnómon”, *Wikipedia*. [Online]. Available at:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Gn%C3%B4mon> [Accessed: 03 05 2020];